

ISSN-1682-0533

Научно-Техническое Общество «КАХАК»

ИЗВЕСТИЯ

Научно-Технического Общества «КАХАК»

2021, № 4(75)

Алматы, 2021

ИЗВЕСТИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА «КАХАК»

Алматы, 2021 г., № 4 (75)

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Мун Г.А. – доктор химических наук, профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бияшев Р.Г. – доктор технических наук, профессор; **Календарь Р.Н.** – кандидат биологических наук, профессор (Хельсинки, Финляндия); **Калтаев А. Ж.** – доктор физико-математических наук, профессор; **Мукашев Б.Н.** – доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК; **Огай В.Б.** – кандидат биологических наук; **Пак И.Т.** – заслуженный деятель науки и техники РК, доктор технических наук, профессор; **Цой О.Г.** – доктор медицинских наук, профессор; **Kim Byung-Soo** – PhD, профессор (Сеул, Республика Корея); **Park Kinam** – PhD, профессор (Уэст Лафайетт, США); **Ю В.К.** – доктор химических наук, профессор, *заместитель главного редактора*; **Югай О.К.** – кандидат химических наук, ассоциированный профессор, *ответственный секретарь*

EDITOR-IN-CHIEF

Mun G.A. – Doctor of Chemical Sciences, professor

THE EDITORIAL BOARD:

Biyashev R.G. – Doctor of Technical Sciences, professor; **Kalendar R.N.** – Candidate of Biological Sciences, professor (Helsinki, Finland); **Kaltayev A.** – Doctor of Physico-mathematical Sciences, professor; **Mukashev B.N.** – Doctor of Physico-mathematical Sciences, professor, NAS RK academician; **Ogay V.B.** – Candidate of Biological Sciences; **Pak I.T.** – Honored Worker of Science and Technology of Kazakhstan, Doctor of Technical Sciences, professor; **Tsoy O.G.** – Doctor of Medical Sciences, professor; **Kim Byung-Soo** – PhD (Seoul, Republic of Korea); **Park Kinam** – PhD, professor (West Lafayette, USA); **Yu V.K.** – Doctor of Chemical Sciences, professor, *Deputy Chief Editor*; **Yugay O.K.** – Candidate of Chemical Sciences, associate professor, *Managing Editor*

Учредитель: Научно-техническое общество «КАХАК»

Издается с 1998 г.

Выходит 4 раза в год.

Свидетельство о регистрации издания № 1561-ж от 3 ноября 2000 г.

Выдано Министерством культуры, информатики и общественного согласия
Республики Казахстан

Подписной индекс: 74838

Подписку можно оформить в отделениях связи АО «Казпочта».

Подписка продолжается в течение года.

Адрес редколлегии и редакции:

050010, г. Алматы, ул. Курмангазы, 40 (Дом Дружбы), офис 34
телефон 8(727)-272-79-02, 8(727)-291-60-69

e-mail: izv.ntokahak@mail.ru

Сайт: www.ntokahak.kz

ISSN-1682-0533

МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА

МРНТИ 47.05.17

УДК 621.3.019

ALGORITHMIZATION FOR CONSTRUCTION OF GENERALIZED RADEMACHER FUNCTIONS IN GALOIS FIELDS

Bakirov A.S.^{1,2}

¹ SB Sberbank JSC

² Almaty university of power engineering and telecommunications named after Gumarbek Daukeev
Almaty, Republic of Kazakhstan
e-mail: axatmr@mail.ru

An algorithm for performing the operation of taking an integer modulo 17 based on the use of a binary encoding is proposed. The advantage of the proposed algorithm is that the modulo operation is completely reduced to the classical logical operations of binary logic, as well as the simplicity of its implementation. It is shown that the use of this algorithm greatly simplifies operations in the corresponding Galois field, which is essential for new methods of digital signal processing based on the use of such fields. Evidence of the efficiency of the proposed algorithm is presented. An example of its specific application to the construction of generalized Rademacher functions taking values in Galois fields is considered. A non-standard graphical representation of such functions is proposed, based on the use of the proposed algorithm and the binary encoding of the elements of the Galois field.

Keywords: Galois fields, residue classes, computational algorithms, binary encoding, Rademacher functions, digital signal processing, Walsh basis.

Екілік кодтауды қолдану негізінде бүтін модуль 17 алу операциясын орындау алгоритмі ұсынылған. Ұсынылған алгоритмнің артықшылығы модульдік операцияның екілік логиканың классикалық логикалық операцияларына толығымен қысқартылуы, сонымен қатар оны жүзеге асырудың қарапайымдылығы болып табылады. Көрсетілгендей, бұл алгоритмді қолдану сәйкес Галуа өрісіндегі операцияларды айтарлықтай жеңілдетеді, бұл мұндай өрістерді пайдалану негізінде цифрлық сигналды өңдеудің жаңа әдістері үшін өте маңызды. Ұсынылған алгоритмнің тиімділігінің дәлелі келтірілген. Галуа өрістерінде мәндерді қабылдайтын жалпыланған Радемахер функцияларын құруға оның нақты қолданылуының мысалы қарастырылады. Ұсынылған алгоритмді пайдалану және Галуа өрісінің элементтерін екілік кодтау негізінде мұндай функциялардың стандартты емес графикалық көрінісі ұсынылады.

Түйінді сөздер: Галуа өрістері, қалдық кластары, есептеу алгоритмдері, екілік кодтау, Радемахер функциялары, цифрлық сигналды өңдеудің, Уоли негізі.

Предложен алгоритм выполнения операции взятия целого числа по модулю 17, основанный на использовании двоичной кодировки. Преимуществом предложенного алгоритма является то, что операция взятия по модулю полностью сводится к классическим логическим операциям двоичной логики, а также простота его реализации. Показано, что использование данного алгоритма существенно упрощает операции в соответствующем поле Галуа, что является существенным для новых методов цифровой обработки сигналов, основанных на применении таких полей. Представлены доказательства работоспособности предложенного алгоритма. Рассмотрен пример

его конкретного применения к построению обобщенных функций Радемахера, принимающих значения в полях Галуа. Предложено нестандартное графическое представление таких функций, основанное на использовании предложенного алгоритма и двоичной кодировки элементов поля Галуа.

Ключевые слова: поля Галуа, классы вычетов, вычислительные алгоритмы, двоичная кодировка, функции Радемахера, цифровая обработка сигналов, базис Уолша.

The Walsh functions, which make up the complete basis of orthogonal functions, are currently one of the most important tools for digital signal processing [1, 2]; they are widely used for applied purposes [3, 4]. In turn, the Walsh functions are built on the basis of the Rademacher functions, which can be interpreted as an attempt to construct a digital analogue of the harmonic functions. This analogy, in principle, can indeed be carried out, however, the basis of the Rademacher functions does not have completeness, therefore, they cannot be used by themselves for digital spectral analysis – one has to provide an extension due to the transition to the Walsh basis. Numerous attempts are known in the literature to construct generalizations of the Rademacher basis [5–7], thereby obtaining a complete analogue of harmonic functions.

However, until very recently this problem remained unsolved and there is reason to believe that it has no solution as long as piecewise constant functions that take real or complex values are considered.

A complete «digital» analog of harmonic functions can be constructed [8, 9] by passing from functions taking real values to functions taking values in Galois fields.

The argument for using functions that take values in Galois fields as a signal model is as follows [8, 9]. First, any signal model, by definition, uses certain mathematical objects to describe real physical processes, and replacing one mathematical object with another is not critical - it is nothing more than a matter of agreement and convenience. Secondly, any real signal changes in a finite range of amplitudes, so when it is converted to discrete levels, their number will certainly be finite. Therefore, for signal models (and only they are used in digital processing), it is certainly possible to use functions that take values in any algebraic systems containing a finite number of elements. Galois fields are one of the most studied and convenient ones. An already developed tool for digital signal processing through functions that take values in such fields is their spectral representation developed in [9]. Moreover, in [10], the advantages of this approach have already been demonstrated, specifically, it has been shown that it is possible to implement an analog of the Rademacher functions that form a complete basis on a certain interval.

The complete basis of orthogonal functions taking values in the Galois fields $GF(p)$, where p is a prime number, was constructed in [9] using the following method. The functions are defined on a time interval that corresponds to $p - 1$ discrete intervals. The basis includes sequences of the form

$$\vec{w}_m = (1, \theta^m, \theta^{2m}, \theta^{3m}, \dots, \theta^{(p-2)m}), \quad (1)$$

where θ is a primitive element whose powers $(p - 2)$ inclusive give all elements of the field that are not equal to zero and one. Since $GF(p)$ is a field, for any element of the field x we have

$$x^{p-1} = 1 \quad (2)$$

that is, the introduction of one more term in the sequence (1) again returns to one. In this sense, the sequences under consideration are certainly periodic.

Set (1) is complemented by the sequence

$$\vec{w}_0 = (1, 1, 1, 1, \dots, 1). \quad (3)$$

The basis formed by the sequences (1) and (3) is complete on the considered interval. In [9] it was called a generalized Rademacher basis.

The considered sequences are orthogonal in the following sense [9]

$$\sum_{j=0}^{j=n-1} \vec{w}_{k_1}^{(j)} \vec{w}_{k_2}^{(j)} = \begin{cases} 1, & k_1 \equiv k_2 \pmod{p} \\ 0, & k_1 \not\equiv k_2 \pmod{p} \end{cases} \quad (4)$$

The orthogonality of the sequences that make up the basis under consideration, understood in the sense of conjugation (4), follows directly from the fundamental theorem, which is valid for Galois fields

$$1 + \zeta + \zeta^2 + \dots + \zeta^{n-1} = \frac{1 - \zeta^n}{1 - \zeta}, \quad (5)$$

where ζ is an arbitrary element of the Galois field $GF(p)$, $n = p - 1$.

The field $GF(17)$ used in [8], as well as its algebraic extensions, seems to be a very interesting object, including from the point of view of transition to calculations in the binary system and vice versa. We emphasize that such transitions are also of applied interest in the light of recent developments in computer technology on an innovative basis (computers based on nanotechnologies, etc.).

Carrying out calculations in the fields $GF(p)$, in particular, in the field $GF(17)$ requires the use of the transition operation from the number obtained by adding or multiplying integers to a number modulo p . For this purpose, there are various algorithms, however, as shown in this paper, for some prime numbers, such an operation can be significantly simplified, moreover, using a binary encoding.

The number 17 is only one more than the number $16 = 2^4$ used in modern computing. Accordingly, by virtue of the identity

$$(a + 1)(a - 1) = a^2 - 1 \quad (6)$$

there is an equality

$$17 \cdot 15 = 16^2 - 1, \quad (7)$$

analogous to which is true for all other similar pairs of numbers.

As follows from the basic theorems of algebra, the field $GF(17)$ is a homomorphism of the ring of integers onto the ring of residue classes modulo 17. This ring becomes a field because the number 17 is prime. Therefore, the operations of addition and multiplication, which are of applied interest, including those reflected in [8,9], should be performed modulo 17.

Let us show that the existence of a connection expressed by relation (7) creates quite certain conveniences in calculations modulo 17, carried out using the binary number system.

Note that in the binary number system, the notation of the number 17 has a certain symmetry.

$$17 =_{(2)} 0001\ 0001. \quad (8)$$

By virtue of relations (7) and (8), any multiple of the considered number $m \cdot 17$, where $m \leq 15$, can be written as follows

$$m \cdot 17 =_{(2)} a_3 a_2 a_1 a_0\ a_3 a_2 a_1 a_0 \quad (9)$$

where a_i are symbols of the binary number system (0 or 1), and

$$m =_{(2)} a_3 a_2 a_1 a_0 \quad (10)$$

The maximum binary number that contains 4 digits is 1111, which is equal to 15. This determines the possibility of using representation (4) for all binary numbers obtained by multiplying $m \leq 15$ by 17. As formula (9) shows, such a product can be obtained immediately, repeating the entry $a_3 a_2 a_1 a_0$ twice.

This can be proved in the following way.

$$m \cdot 17 = m \cdot 16 + m =_{(2)} m \cdot 10000 + m \quad (11)$$

In the first term of formula (11), the positions corresponding to the lower four digits are zeros, therefore, these positions in the sum will contain symbols that exactly correspond to the number m in binary notation.

Consider an arbitrary 8-bit number in binary notation

$$a_3 a_2 a_1 a_0\ b_3 b_2 b_1 b_0 \quad (12)$$

It can be reduced to a number modulo 17, as follows from (9), by subtracting from it the number formed by the repetition of the first four digits, i.e. exactly the number that is on the right side of formula (9).

Provided that $m \leq n$, where $m =_{(2)} a_3 a_2 a_1 a_0$, $n =_{(2)} b_3 b_2 b_1 b_0$, such a subtraction operation immediately gives the desired result. This is illustrated by the third column of Table 1, which contains examples of numbers obtained by subtracting $n - m$ in binary notation. Provided that $m \leq n$, the desired number i.e. the number $c_3 c_2 c_1 c_0$, which is obtained by taking the binary number $a_3 a_2 a_1 a_0\ b_3 b_2 b_1 b_0$ modulo 17, will be exactly equal to the difference under consideration.

If $m > n$, i.e. a negative number appears in the third column, then you need to add 17 to it in binary notation, i.e. the number 10001. In all but one case, the result (fifth column of Table 1) is also a four-digit binary number. The exception is when the subtraction result is -0001, then another non-zero high order appears, which is shown by the fourth column of this table.

Note that when using the operation of multiplication and exponentiation, for example, to construct generalized Rademacher functions for a specific field $GF(17)$, it is sufficient to have a multiplication table of 16 by 16. As follows from relation (7), such a table will include only 8-bit binary numbers with one exception - the numbers 16^2 . It also follows from formula (7) that $16^2 \equiv 1(17)$, i.e. the only 9-bit number that can occur when the result of multiplication is reduced, after modulo 17, it goes into one.

Table 1 – The result of converting a binary number to a binary number modulo 17

	$a_3a_2a_1a_0$	$b_3b_2b_1b_0$	$n - m$	q	$c_3c_2c_1c_0$
0	0000	0000	0000	0	0000
1	0000	0001	0001	0	0001
2	0000	0010	0010	0	0010
3	0000	0011	0011	0	0011
4	0000	0100	0100	0	0100
...					
15	0000	1111	1111	0	1111
16	0001	0000	-0001	1	0000
17	0001	0001	0000	0	0000
18	0001	0010	0001	0	0001
19	0001	0011	0010	0	0010
20	0001	0100	0011	0	0011
...					
31	0001	1111	1110	0	1110
32	0010	0000	-0010	0	1111
33	0010	0001	-0001	1	0000
34	0010	0010	0000	0	0000

This transformation is obviously written as follows

$$1\ 0000\ 0000 \rightarrow 0\ 0000\ 0001 \tag{13}$$

Therefore, for generality, the proposed algorithm should be described as follows.

As a result of operations of addition and multiplication of integers not exceeding 16, in binary representation, generally speaking, a 9-digit number is formed, but the only option when the most significant digit is different from zero is the number (13).

Therefore, to convert such a number to a 5-digit number format, it is enough to use the algorithm described above and add the value of the most significant digit to the result.

Let us demonstrate the performance of this algorithm by using it to construct generalized Rademacher functions, which were previously constructed in [9] using a different method. In order to emphasize the use of an algorithm operating with binary logic, we will use the following graphical representation of such functions.

On an interval containing 16 cycles, we construct a 16×5 grid (Fig. 1). The number of columns in such a grid corresponds to the number of cycles, and the number of rows corresponds to the

number of binary digits required to display the elements of the Galois field $GF(17)$ in binary representation. Light squares correspond to the value 0 in the corresponding digit, dark squares – 1.

Examples of generalized Rademacher functions displayed in this way are shown in fig. 1 (a – d). These examples correspond to sequences (1), in which the number 3(a, b) 2 (c, d) is chosen as a primitive element, the numbers m are 1 (a, c) 2 (b, d), respectively.

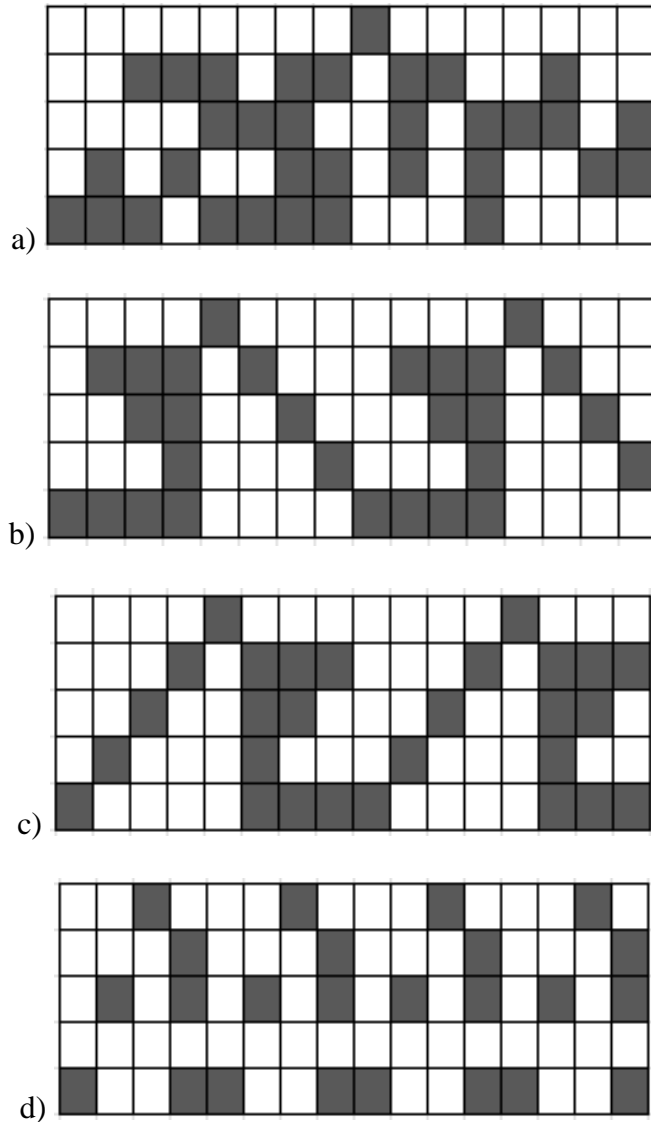


Figure 1 – Graphical representation of generalized Rademacher functions in the Galois field $GF(17)$ in binary logic

Thus, we can propose a simple algorithm that provides operations in the Galois field $GF(17)$. This field is of significant interest from the point of view of digital signal processing. Of course, one can object that the paper considers only a special case that provides convenience from the point of view of the transition to binary encoding, but such an objection is not tenable. Namely, the entire modern digital world is de facto also built on the use of a special case of Galois fields - $GF(2)$, which corresponds to binary logic. The choice of a specific field is nothing more than a matter of convenience and convention, and there are arguments in favor of choosing other fields, which makes it relevant, among other things, to consider various special cases.

References:

1. Bondarenko G. A. Image processing using haart and Walsh functions //Presenting Academic Achievements to the World. Natural Science. – 2019. – С. 15–19.
2. Sestacova T., Sorochin G., Jdanov V. Analysis of the correlation properties of direct and inverse composite Walsh functions //Mathematical Modeling. – 2021. – Т. 5. – N 1. – С. 3–7.
3. Leprêtre F. et al. Walsh functions as surrogate model for pseudo-boolean optimization problems //Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. – 2019. – P. 303–311.
4. Silvério T. et al. Walsh-coded orthogonal chaotic shift keying for key distribution in visible light communication systems //Optics Communications. – 2022. – Vol. 505. – P. 127538.
5. Sadkhan S. B. Proposed Development of Scattering Problem Solution based on Walsh Function //2019 4th Scientific International Conference Najaf (SICN). – IEEE, 2019. – С. 54–58.
6. Lukomskii S. F., Terekhin P. A., Chumachenko S. A. Rademacher Chaoses in Problems of Constructing Spline Affine Systems //Mathematical Notes. – 2018. – Т. 103. – N. 5. – С. 919–928.
7. Roslidar R., Zulfikar Z. MATLAB based Design for an 8-point Discrete Fourier Transform formed on Products of Rademacher Functions //Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC). – 2018. – Vol. 10. – N 2–5. – С. 39–43.
8. Suleimenov I., Matrassulova D., Moldakhan I. Spectral representations of digital signals using non-binary Galois fields. // 3rd International Symposium on Signal Processing Systems (SSPS). – 2021. – March – P. 32–37.
9. Moldakhan I., Matrassulova D. K., Shaltykova D.B., Suleimenov I.E. Some advantages of non-binary Galois fields for digital signal processing // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2021. – Vol. 23, N 2. – P. 871–877.
10. Vitulyova E.S., Matrassulova D.K., Suleimenov I.E. Application of Non-binary Galois Fields Fourier Transform for Digital Signal Processing: to the Digital Convolution Theorem // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2021. – Vol. 23, N 3. – P. 1718–1726.

Поступила 15 ноября 2021 г.

МРНТИ 78.25.23

УДК 355/359

СИСТЕМЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ МАССОВЫМ БЕСПОРЯДКАМ НА ОСНОВЕ БОЕВЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Витулёва Е.С.¹, Коньшин С.В.¹, Мун Г.А.²

¹Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби

Алматы, Республика Казахстан

e-mail: lizavita@list.ru

Показано, что одним из наиболее актуальных направлений примирения боевых нейронных сетей, представляющих собой рой беспилотных аппаратов, объединенных в единое функциональное целое системой искусственного интеллекта, является создание новых систем противодействия массовым беспорядкам. Основой функционирования системы искусственного интеллекта, комплектующего боевую нейронную сеть, является система распределенной телеметрии. Показано, что системы распределенной телеметрии целесообразно реализовывать на основе разделения спектра пространственных частот по поддиапазнам, каждый из которых отвечает определенному видеорегистратору. Показано, что при таком подходе обработку спектров пространственных частот, обеспечивающую получение целостной картины на основе данных, поступающих от видеорегистраторов, случайным образом расположенных в пространстве, целесообразно проводить с использованием преобразований Фурье в полях Галуа. Предложена конкретная разновидность боевой нейронной сети, предназначенной для противодействия массовым беспорядкам (разновидность нелетальных вооружений), основанная на использовании химических источников ультразвуковых колебаний. Преимуществом такого подхода является возможность использования источников ультразвука с произвольной диаграммой направленности, а также контролируемое воздействие на скопление участников массовых беспорядков, сопряженное с отслеживанием из действий через систему распределенной телеметрии. Обсуждаются дальнейшие пути совершенствования систем предложенной разновидности, в том числе, основанные на использовании акустически активных сред.

Ключевые слова: боевые нейронные сети, искусственный интеллект, массовые беспорядки, гибридная война, распределенная телеметрия, ультразвуковые излучатели, поля Галуа, преобразование Фурье.

Жасанды интеллект жүйесі арқылы біртұтас функционалдық тұтастыққа біріктірілген ұшқышсыз көліктер шоғыры болып табылатын жауынгерлік нейрондық желілерді үйлестірудің ең өзекті бағыттарының бірі жаппай тәртіпсіздікке қарсы жаңа жүйелерді құру екені көрсетілген. Жауынгерлік нейрондық желіні аяқтайтын жасанды интеллект жүйесінің жұмыс істеуінің негізі таратылған телеметриялық жүйе болып табылады. Кеңістіктік жиілік спектрін ішкі жолақтарға бөлуге негізделген таратылған телеметриялық жүйелерді енгізу мақсатқа сай екені көрсетілді, олардың әрқайсысы нақты бейнетіркегішке сәйкес келеді. Көрсетілгендей, бұл тәсілмен кеңістікте кездейсоқ орналасқан бейнетіркегіштердің мәліметтері негізінде толық суретті қамтамасыз ететін кеңістіктік жиілік спектрлерін өңдеу Галуа өрістерінде Фурье түрлендірулерін қолдану арқылы жүзеге асырылуы керек. Ультрадыбыстық тербелістердің химиялық көздерін пайдалануға негізделген тәртіпсіздіктерге қарсы тұруға арналған жауынгерлік нейрондық желінің ерекше түрі

(өлтірмейтін қару түрі) ұсынылады. Бұл тәсілдің артықшылығы - ерікті сәулелену үлгісімен ультрадыбыстық көздерін пайдалану мүмкіндігі, сондай-ақ таратылған телеметрия жүйесі арқылы әрекеттерді бақылаумен бірге тәртіпсіздіктердің жинақталуына бақыланатын әсер ету. Ұсынылған сорттың жүйелерін жетілдірудің одан әрі жолдары, соның ішінде акустикалық белсенді ортаны пайдалануға негізделген жолдары талқыланады.

Түйінді сөздер: жауынгерлік нейрондық желілер, жасанды интеллект, жаппай тәртіпсіздіктер, гибридтік соғыс, таратылған телеметрия, ультрадыбыстық эмитенттер, Галуа өрістері, Фурье трансформациясы.

It is shown that one of the most relevant areas of reconciliation of combat neural networks, which are a swarm of unmanned vehicles united into a single functional whole by an artificial intelligence system, is the creation of new anti-riot systems. The basis of the functioning of the artificial intelligence system that completes the combat neural network is a distributed telemetry system. It is shown that it is expedient to implement distributed telemetry systems based on the division of the spatial frequency spectrum into subbands, each of which corresponds to a specific video recorder. It is shown that with this approach, the processing of spatial frequency spectra, which provides a complete picture based on data from video recorders randomly located in space, should be carried out using Fourier transforms in Galois fields. A specific type of combat neural network designed to counter riots (a type of non-lethal weapons) based on the use of chemical sources of ultrasonic vibrations is proposed. The advantage of this approach is the possibility of using ultrasound sources with an arbitrary radiation pattern, as well as a controlled impact on the accumulation of rioters, coupled with tracking of actions through a distributed telemetry system. Further ways of improving systems of the proposed variety are discussed, including those based on the use of acoustically active media.

Keywords: combat neural networks, artificial intelligence, riots, hybrid warfare, distributed telemetry, ultrasonic emitters, Galois fields, Fourier transform.

Введение: боевые нейронные сети и проблема распределенной телеметрии

Фактор ядерного сдерживания, как известно, существенно ограничивает риск масштабного военного конфликта, следствием чего является появление так называемых «гибридных» войн. Их особенностью, в том числе, является масштабное привлечение гражданского населения к участию в протестных акциях, нацеленных на дестабилизацию социально-политической обстановки в стране-мишени. Для достижения данной цели существуют различные средства, тесно связанные с инструментарием информационных войн.

Очевидно, что оптимальной формой противодействия является предотвращение массовых беспорядков, включая проведение мероприятий, блокирующих негативные информационные воздействия, преследующие цели такого рода. Однако в силу целого ряда факторов успех превентивных действий во многих постсоветских странах гарантировать невозможно. Отметим, что одним из таких факторов является также и консерватизм научного сообщества [1], которое с упорством, достойным лучшего применения, продолжает игнорировать необходимость теснейшей междисциплинарной кооперации даже в отношении критически важных проблем. В частности, как подчеркивалось в [2, 3], отыскание мер противодействия современным формам информационной войны представляет собой именно междисциплинарную задачу, но тезис о конвергенции естественнонаучного и гуманитарного знания еще весьма далек от реального практического использования. Главным образом – именно из-за консерватизма значительной части научного сообщества.

Ситуация осложняется тем, что любые протесты, как правило, связаны с объективными факторами, в том числе – экономическими. Соответственно в ходе масштабных протестных акций часто сложно отделить тех, кто выдвигает разумные требования от деструктивных элементов – последние могут использовать объективно складывающиеся процессы в своих целях.

Тем самым рассматриваемая задача требует комплексного подхода, причем не просто на уровне междисциплинарной кооперации. Скорее, речь идет об осмыслении на уровне натурфилософии, на уровне новой парадигмы науки постиндустриального общества, о которой говорилось в [4, 5].

Вызовы носят комплексный характер, в них теснейшим образом переплетены экономические и социальные проблемы, риски, связанные с трансформацией миропорядка, и обострением геополитической конкуренции, а также многое другое (например, пандемия ковид-19). Рассматривать любой из этих вызовов, ограничиваясь рамками отдельных конкретных наук, уже заведомо представляется неоправданным.

Однако высказанные тезисы сами по себе для многих выглядят абстрактно. Их нужно наполнять конкретным содержанием.

Пример использования комплексного междисциплинарного подхода, ориентированный на разработку нетривиальных систем противодействия массовым беспорядкам, рассматривается в данной работе.

Данный пример, в том числе, доказывает, что комплексный подход к решению текущих проблем может быть плодотворным даже тогда, когда речь идет, казалось бы, о частных вопросах прикладного характера.

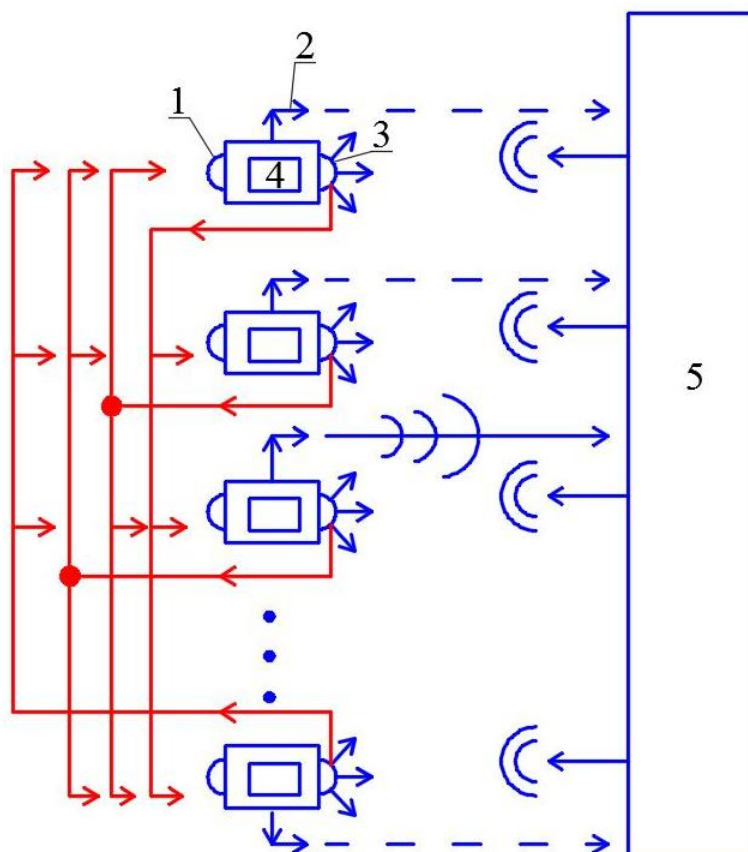
Оттолкнувшись от рассмотрения боевых нейронных сетей, концепция которых была предложена в [6]. Она состоит в следующем. Как показывает анализ открытых источников информации, в частности [7–10], в настоящее время наблюдается устойчивая тенденция на снижение стоимости отдельных компонент (роботизированных систем вооружений), которые потенциально могут быть включены в боевые нейронные сети. Логическим итогом здесь является переход к максимальным дешёвым системам, в которых основную роль, будут играть сами системы искусственного интеллекта, но не техническая реализация аналогов отдельных нейронов [6].

Фактически речь идет о переходе к предельному случаю тактики «осинового роя», которая также обсуждается в открытой печати [11-13].

Общая схема БНС рассматриваемого типа как и ее конкретный пример, представленный на рисунке 1, топологически совпадает со схемой нейропроцессора Хопфилда, с тем отличием, что в зависимости от конкретной реализации алгоритма управления БНС каждый элемент БНС может содержать несколько нейронов, в том числе, функционирующих с использованием многозначной логики.

Блоки оптико-электронной регистрации (1) осуществляют регистрацию интенсивности излучения оптического или инфракрасного диапазона, совокупно формируемым излучением, создаваемым целями в предполагаемой зоне боевого применения группы беспилотных аппаратов, а также излучением, создаваемого источниками света, входящими в состав блока оптического обмена информацией (3). Т.е. данные блоки выполняют двоякую функцию. С одной стороны, они регистрируют излучение видимого или инфракрасного диапазона, создаваемого потенциальными целями (разогретыми моторами машин, личным составом противника, стволами орудий, стволами легкого стрелкового оружия, и т.д.). С другой стороны, они обеспечивают обмен информацией между элементами системы.

Сигналы, снимаемые с блоков (1), поступают на микропроцессоры (4), устанавливаемые на каждом из летательных аппаратов группы. В состав радиоэлектронных блоков данных аппаратов входят также радиопередатчики (2), предназначенные для создания радиоканала с блоком управления оперативного сопровождения (5). Последний пункт является вариативным и может быть исключен при реализации БНС, предназначенной для действий в автономном режиме.



1 – блоки оптической регистрации, 2 – радиоканал связи с оператором (сплошной линией выделен единственный канал, задействованный в данный момент времени), 3 – блоки оптического обмена информацией, 4 – микропроцессоры, 5 – блок управления и оперативного сопровождения БНС

Рисунок 1 – Пример схемы БНС

Наиболее перспективный алгоритм, обеспечивающий функционирование группы боевых летательных аппаратов, формирующих в совокупности БНС, заведомо будет построен по принципу искусственной нейронной сети. В простейшей форме такого алгоритма блоки (1) выполняют функции первого слоя нейронов данной сети. В более сложных случаях речь идет о том, что сами элементы БНС формируют систему искусственного интеллекта за счет обмена информацией между ними. Реализацию алгоритма в данном случае наиболее целесообразно реализовать через обмен информацией между элементами БНС по оптическим каналам. Это позволяет исключить воздействие на систему любых методов радиоэлектронной борьбы в силу ограниченного радиуса действия оптических каналов передачи информации. Подчеркиваем, что вывод о том, что наиболее перспективный

алгоритм следует считать именно таким, сделан не только на основе анализа открытых источников информации, отражающих сведения об использовании роботизированных систем в боевых действиях, но также и на основе общих представлений о характере функционирования нейронных сетей. Фактически, именно такой алгоритм соответствует максимальным возможностям классических нейронных сетей, которые активно развиваются в настоящее время.

Однако, для целей данной работы наибольший интерес представляет именно возможность комплексного решения целого ряда задач, которая возникает за счет фактического сопряжения роя беспилотных аппаратов с системой искусственного интеллекта.

А именно в этом случае допустимо ставить вопрос о параллельном решении следующих задач.

- собственно противодействие массовым беспорядкам;
- идентификация участников беспорядков (практическая реализация юридического принципа неотвратимости наказания);
- идентификация и дешифровка реальных механизмов организации и управления.

Параллельное решение данных задач достигается за счет использования систем распределенной телеметрии, сопряженной с БНС. Рассмотрим данный вопрос подробнее.

В настоящее время системы телеметрии и видеонаблюдения получают все большее распространение [14,1 5]. Насыщенность многих мегаполисов мира видеорегистраторами различного типа и назначения растет стремительными темпами, равно как и объем обрабатываемой видеоинформации [16, 17]. В обозримой перспективе число видеорегистраторов, приходящихся на единицу площади (если говорить о плотной городской застройке – объема) достигнет величины, при которой оправданным становится переход именно к распределенной телеметрии [18, 19], т.е. о средствах, обеспечивающих воссоздание единой картины (в том числе, и трехмерной) на основании видеоинформации, получаемой при помощи большого числа видеокамер, расположенных в различных точках пространства.

Данная задача тесно примыкает к получению целостной видеоинформации, получаемой при помощи большого числа беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), рассмотренной выше, т.е. можно видеть, что область применения распределенной телеметрии является весьма обширной. В обозримой перспективе встанет вопрос о разработке средств, обеспечивающих получение единой картины на основе данных, получаемых от большого количества БПЛА.

Задача совмещения (синтеза) изображений, получаемых при помощи набора видеорегистраторов, вообще говоря, является весьма нетривиальной [20], для ее решения предлагаются различные подходы, в том числе, основанные на использовании нейронных сетей [21].

Однако, как показано в данной работе, наиболее перспективные средства создания синтетических видеоизображений, заведомо связаны с обработкой спектров пространственных частот (СПЧ).

Понятие СПЧ наиболее активно разрабатывалось в Фурье-оптике [22], более того, в работах [23, 24] было показано, что существует возможность развить аппарат Фурье-оптики как один из вариантов решения краевых задач математической физики.

Отличие СПЧ от спектров, обычно используемых в радиотехнике, состоит только в том, что в данном случае преобразование Фурье применяется к функциям, зависящим от пространственных переменных, а не от времени.

Очевидное преимущество использования СПЧ для решения задач распределенной телеметрии состоит в том, что в данном случае отдельный видеорегистратор может получать данные, относящиеся только к определенному спектральному диапазону пространственных частот. Более того, в силу фундаментальных особенностей использования спектральных методов, существенно упрощается восстановление общей картины (вплоть до трехмерной).

Однако, использование спектрального представления, использующего гармонические функции, применительно к обработке цифровых изображений, далеко не всегда является оправданным. Применительно к сигналам, зависящим от времени, в последние десятилетия получили широкое распространение методы, основанные на использовании базиса Уолша и его различных модификаций [25].

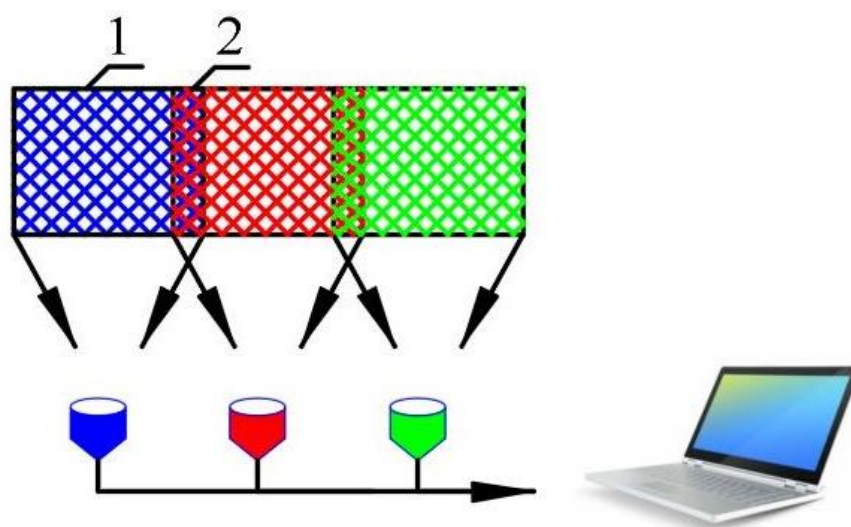
Известно также преобразование Фурье, основанное на использовании полей Галуа, в том числе, небинарных [26]. Как показано в [27, 28] использование полей Галуа обладает вполне определенными преимуществами, в том числе, для цифровой обработки сигналов.

В данной работе показано, что переход к преобразованию Фурье на основе небинарных полей Галуа позволяет развить удобные методы распределенной телеметрии, позволяющие, в частности, получать единое изображение на основе данных, поступающих с большого числа видеорегистраторов, расположенных в различных точках пространства.

Также показано, что данный подход допускает эффективное сопряжение с системами противодействия массовым беспорядкам на новых физических принципах.

Распределенная телеметрия: использование преобразования Фурье в небинарных полях Галуа

Рассмотрим случай (рисунок 2), когда большое количество тех или иных технических средств (например, БПЛА) снабжено видеорегистраторами (видеокамерами). Сходная задача возникает и тогда, когда, скажем, служба охраны конкретного здания осуществляет мониторинг охраняемого объекта. Стандартный подход состоит в следующем: на экран компьютера, находящегося в распоряжении охраны, выводится сразу несколько изображений, каждое из которых поступает с отдельной видеокамеры.



1 – зоны регистрации изображения, 2 – область перекрытия зон регистрации

Рисунок 2 – К общей постановке задачи – «осиновый рой» беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), каждый из которых снабжен собственным видеорегистратором

Очевидно, что по мере возрастания числа таких изображений оператору будет все труднее и труднее воспринимать интегральную информацию. Намного более удобным является использование синтетической картины, получаемой в результате компьютерной обработки. Таких методов существует достаточно много, однако, можно показать, что спектральная обработка видеоизображений обладает фундаментальными преимуществами.

Покажем это, рассмотрев упрощенный вариант рассматриваемой задачи. Пусть имеется набор видеокамер, расположенных в одной и той же плоскости, и обладающих одними и теми же характеристиками. Тогда, по крайней мере в приближении изопланарной оптики, изображения, создаваемые ими, будут совпадать с друг с другом с точностью до сдвига в той плоскости, в которой они расположены. Выбирая данную плоскость в качестве координатной, можно записать

$$J_k(x, y) = J_0(x - x_k, y - y_k) \quad (1)$$

где $J_k(x, y)$ – распределение интенсивности излучения, регистрируемое камерой с номером k , $J_0(x, y)$ – распределение интенсивности излучения, регистрируемое камерой, расположенной в начале координат (ее номер выбран равным 0), (x_k, y_k) – координаты камеры с номером k в выбранной плоскости.

Корректно, под интенсивностью $J_k(x, y)$ следует понимать распределение интенсивности в плоскости, где, собственно, и происходит регистрация освещенности, например, это может быть фокальная плоскость объектива видеокамеры.

Применяя к выражению (1) преобразование Фурье, легко видеть, что имеет место следующее соотношение, являющееся одним из базовых для спектрального анализа.

$$F[J_k(x, y)](k_x, k_y) = \exp(-i[k_x x_k + k_y y_k]) F[J_0(x, y)](k_x, k_y) \quad (2)$$

где через $F[J_k(x, y)](k_x, k_y)$ обозначена операция прямого преобразования Фурье, примененного к функции $J_k(x, y)$

$$F[J(x, y)](k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \int J(x, y) \exp(-i[k_x x + k_y y]) dx dy, \quad (3)$$

k_x, k_y – компоненты вектора пространственных частот \vec{k} , иначе – переменные спектра пространственных частот.

Данные переменные являются аналогами частоты при осуществлении преобразования Фурье по переменной времени.

Каждая пара значений k_x, k_y отвечает определенной пространственной спектральной компоненте, что непосредственно вытекает из выражения для обратного преобразования Фурье

$$J(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int A(k_x, k_y) \exp(i[k_x x + k_y y]) dk_x dy k_y, \quad (4)$$

где

$$A(k_x, k_y) = F[J(x, y)](k_x, k_y), \quad (5)$$

Подчеркнем, что в отличие от классической Фурье-оптики, в выражении (2) преобразование Фурье применяется к распределениям освещенности, а не к распределениям амплитуд электромагнитной волны, т.е. в данном случае не учитывается фаза колебания, но в этом и нет необходимости, поскольку речь идет о восстановлении обычных, а не голографических изображений.

Из соотношения (2) следует важный вывод, который и позволяет говорить о применении спектральных методов к системам распределенной телеметрии.

А именно, создание интегральной картины, получаемой за счет использования большого числа видеорегистраторов, расположенных в плоскости Oxy , при помощи спектральных методов может быть осуществлено на основании следующего алгоритма (рисунок 3).

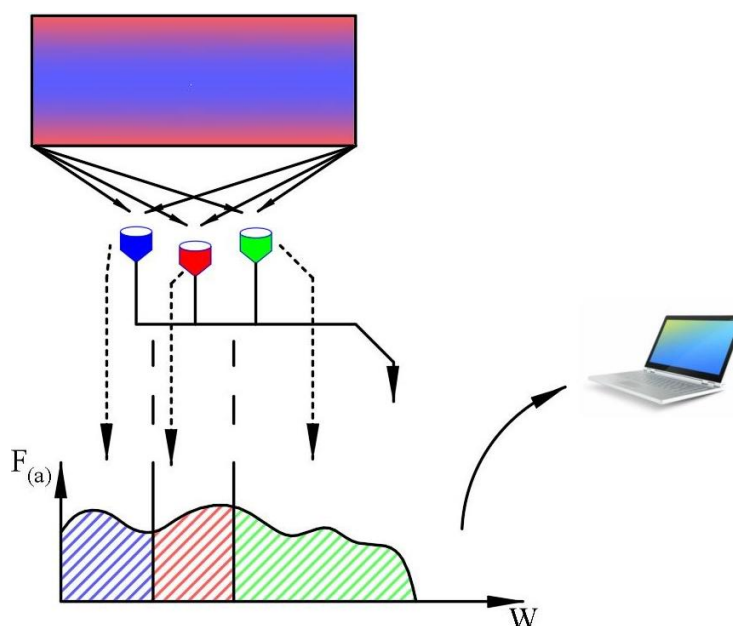


Рисунок 3 – Иллюстрация к алгоритму получения целостного изображения на основе использования спектра пространственных частот

Плоскость проекций волновых векторов Ok_xk_y расчленяется на несколько областей по числу имеющихся видеорегистраторов (вообще говоря, данные области могут перекрываться).

Каждый из видеорегистраторов фиксирует не отдельный фрагмент изображения, но отдельный фрагмент СПЧ (по распределению освещенности).

Далее, полученные спектры приводятся к одному и тому же началу координат в соответствии с формулой (2). Технически такая операция, очевидно, является намного более простой, нежели любые попытки совместить картинки, получаемые с различных регистраторов.

Доказать это можно, рассматривая простейшее соображение. Для того, чтобы картинки, получаемые с различных регистраторов, использовались при создании синтетического изображения равноправным образом, необходимо, чтобы они фиксировали одинаковые по геометрии фрагменты общего изображения. Это налагает более чем серьезные ограничения на характер их взаимного расположения, что можно реализовать далеко не всегда, особенно, если регистраторы непредсказуемым образом перемещаются в пространстве.

Напротив, если регистраторы фиксируют только определенный фрагмент СПЧ, то такого рода ограничения заведомо отсутствуют. Приведение к общему началу координат осуществляется при помощи формулы (2), которая отвечает сравнительно простой операции.

Использование спектров пространственных частот, получаемых с использованием гармонических функций, для решения поставленной задачи далеко не является, однако, оптимальным.

Во-первых, численное вычисление преобразования Фурье (3), равно как обратного к нему (4), связано с появлением ошибок вполне определенного типа, что и обусловило широкое распространение спектров, построенных на использовании других базисов, в частности, базиса Уолша и его различных модификаций.

Функции Уолша, составляющие ортогональный базис, являются кусочно-постоянными, что и создает вполне определенные преимущества при обработке цифровых сигналов.

Однако ни сами функции Уолша, ни их известные модификации не позволяют получить соотношение, аналогичное соотношению (1), которое могло бы быть положено в основу цифровой распределенной телеметрии, основанной на использовании спектральных методов. Более широко, можно утверждать, что базис Уолша только в самом первом приближении решает задачу по отысканию «цифрового» аналога гармонических функций, которые бы обладали всеми их фундаментальными свойствами, одно из которых выражается соотношением (1).

Следовательно, встает задача по отысканию таких «цифровых» базисов, которые бы одновременно и создавали те же преимущества для цифровой обработки сигналов, что и базис Уолша (и/или его модификации), и обладали теми фундаментальными свойствами спектров, которыми обладают спектры, реализуемые на основе гармонических функций, и которые позволяют реализовывать системы распределенной телеметрии в указанном выше смысле.

В работах [27, 28] было показано, что существует возможность построить обобщенные функции Радемахера, отталкиваясь от того факта, что любые сигналы, реально используемые на практике, изменяются в конечном диапазоне амплитуд. Это, в частности, означает, что при переходе к любым «цифровым» сигналам может иметь место только конечное число уровней амплитуд, которые отвечают таким сигналам.

Отсюда вытекает, что в качестве модели сигнала могут использоваться функции, которые принимают значения не в поле действительных чисел, а в конкретном поле Галуа. Последние, по определению, представляют собой конечные коммутативные тела, они обладают всеми свойствами полей (наличие обратных элементов и т.д.), но содержат только конечное число элементов.

Как продемонстрировано в [27, 28], использование дискретных уровней, отвечающих двоичным разрядам, – это не более, чем вопрос соглашения. Существуют задачи, для решения которых имеет смысл использовать поля Галуа, отличающиеся от $GF(2)$, т.е. от того поля, которое содержит только два элемента (0 и 1), и которое отвечает наиболее распространенной двоичной логике.

Преимуществом небинарных полей Галуа является, в частности, возможность построения обобщенных функций Радемахера (функций, образующих в соответствующем поле Галуа полный базис [27, 28] на промежутке, содержащем p тактов, где p – простое число). Уместно напомнить, что классические функции Радемахера образуют полный базис только на промежутке, содержащем два такта. Для перехода к базису на промежутках, содержащих большее число тактов, приходится переходить к базису Уолша. При использовании моделей

сигналов, основанных на функциях, принимающих значения в полях Галуа $GF(p)$, этого не требуется.

Покажем, что обобщенные функции Радемахера, строящиеся в соответствии с методикой [27, 28], действительно обладают свойством, аналогичным тому, которое для гармонических функций выражается соотношением (1).

В соответствии [27, 28], обобщенные функции Радемахера строятся следующим образом.

Для любого элемента ζ произвольного поля Галуа, содержащего $n + 1$ элементов, имеет место

$$\zeta^{n+1} - \zeta = 0 \text{ и } \zeta^n - 1 = 0 \tag{6}$$

Далее, имеет место общая теорема для суммы степеней примитивного элемента.

$$1 + \zeta + \zeta^2 + \dots + \zeta^{n-1} = \begin{cases} n, & \zeta = 1 \\ 0, & \zeta \neq 1 \end{cases} \tag{7}$$

где n – число ненулевых элементов в данном поле Галуа.

Данная теорема применима к любому элементу из любого поля Галуа, так как при $\zeta \neq 1$ имеет место соотношение, вытекающее из формулы для геометрической прогрессии

$$1 + \zeta + \zeta^2 + \dots + \zeta^{n-1} = \frac{1-\zeta^n}{1-\zeta}, \tag{8}$$

Подчеркиваем, что в формуле (8) число n фигурирует только формально, так как суммирование следует производить именно в смысле сложения в данном конкретном поле, а n далеко не обязательно является его элементом. Число n в формуле (8), соответственно, является не более чем символом, подразумевающим суммирование n единиц.

Построим следующие последовательности, отталкиваясь от некоторого примитивного элемента θ , степени которого по $(n - 1)$ -ую включительно дают все ненулевые элементы рассматриваемого поля Галуа.

$$\begin{aligned} w_1 &= (1, \theta, \theta^2, \theta^3, \dots, \theta^{n-1}) \\ w_2 &= (1, \theta^2, \theta^{2 \cdot 2}, \theta^{2 \cdot 3}, \dots, \theta^{2 \cdot (n-1)}) \end{aligned} \tag{9}$$

...

$$w_{n-1} = (1, \theta^{(n-1)}, \theta^{(n-1) \cdot 2}, \theta^{(n-1) \cdot 3}, \dots, \theta^{(n-1) \cdot (n-1)})$$

Данные последовательности также можно рассматривать как функции дискретного времени или дискретного пространства, что существенно для распределенной телеметрии.

Подчеркиваем, что для поля $GF(p)$ в силу (6) все степени, фигурирующие в (9), де факто не превосходят p . Иначе, входящие в них произведения целых чисел (степени) вычисляются по $\text{mod}(p + 1)$.

Таких последовательностей, как вытекает из (9), ровно $n = p - 1$, где n - число ненулевых элементов в используемом поле Галуа. Дополним множество этих последовательностей последовательностью

$$w_0 = (1,1,1,1, \dots, 1), \quad (10)$$

состоящей только из единиц.

Каждая последовательность (9) сформирована по следующему правилу. Фиксируется некоторая степень θ^k элемента θ . Соответственно m -тый член k -той последовательности будет равен θ^{mk} , если считать, что первый член отвечает значению $m = 0$. Последовательность (10) также отвечает этому правилу, если положить $k = 0$.

При включении (10) в множество (9), очевидно, число последовательностей рассматриваемого вида будет равно p – числу элементов рассматриваемого поля Галуа.

Для каждой из последовательностей (9) существует одна и только одна последовательность из этого множества, для которой выполняется условие

$$\sum_{j=0}^{j=n-1} w_{k_1}^{(j)} w_{k_2}^{(j)} = 1 \quad (11)$$

Такие последовательности можно назвать сопряженными; равенство (11) справедливо для последовательностей с номерами, удовлетворяющими условию

$$k_1 \equiv k_2 \pmod{p+1} \quad (12)$$

Соотношение (11) вытекает из того, что прямое произведение последовательностей (9) друг на друга имеет вид

$$w_{k_1} * w_{k_2} = (1, \theta^{(k_1+k_2)}, \theta^{2(k_1+k_2)}, \dots, \theta^{(n-1)(k_1+k_2)}) \quad (13)$$

Полагая

$$\zeta = \theta^{(k_1+k_2)} \quad (14)$$

и применяя формулу (8), получаем

$$\sum_{j=0}^{j=n-1} w_{k_1}^{(j)} w_{k_2}^{(j)} = \begin{cases} 1, & k_1 \equiv k_2 \pmod{p+1} \\ 0, & k_1 \not\equiv k_2 \pmod{p+1} \end{cases} \quad (15)$$

На основании (15) можно сразу перейти к спектральному представлению сигнала в виде

$$\vec{u} = \sum_{j=0}^{j=n-1} z_j \vec{w}_j \quad (16)$$

Умножение соотношения (16) на вектор \vec{w}_j^T , сопряженный (в смысле формулы (11)) с \vec{w}_j , в силу (15) дает

$$(\vec{u}, \vec{w}_j^T) = \sum_{i=0}^{i=n-1} z_i (\vec{w}_i, \vec{w}_j^T) = z_j \quad (17)$$

Из соотношения (17) вытекает, что полученные последовательности можно трактовать как обобщенные функции Радемахера, составляющие полную систему только для случая минимального числа тактов.

Действительно, соотношение (10) можно трактовать по аналогии с условием ортогональности функций комплексного переменного при условии, что рассматриваются

кусочно-непрерывные функции, сводимые к последовательностям, содержащим p тактов, что соответствует использованию поля $GF(p)$. Можно видеть, что такие функции образуют полный базис, т.е. через него может быть представлена любая функция, заданная на p тактах, а также любая p -периодическая функция.

Представленные выше функции, которые можно трактовать как обобщенные функции Радемахера, позволяют получить результат, являющийся прямым аналогом известного свойства гармонических сигналов, состоящего в том, что Фурье-образ сигнала, сдвинутого по времени или по пространству, отличается от исходного только фазовым множителем.

Получим прямой аналог свойства (2) для спектров, получаемых на основе обобщенных функций Радемахера.

Аналогия со сдвигом по времени или по пространству для периодических сигналов, отвечающих рассматриваемой системе отчетов, значения амплитуд которых отображаются в некоторое поле Галуа, состоит в следующем.

Имеется исходная последовательность

$$\vec{f}(0) = (f_0, f_1, f_2, f_3, \dots, f_{n-1}) \quad (18)$$

Циклическая перестановка на одно положение отвечает сдвигу по времени на один такт.

$$\vec{f}(1) = (f_{n-1}, f_0, f_1, f_2, \dots, f_{n-2}) \quad (19)$$

$$\vec{f}(2) = (f_{n-2}, f_{n-1}, f_0, f_1, \dots, f_{n-3}) \quad (20)$$

Сформируем прямое произведение

$$\vec{w}_k * \vec{f}(1) = (1 \cdot f_{n-1}, \theta^k \cdot f_0, \theta^{2k} \cdot f_1, \dots, \theta^{(n-1)k} \cdot f_{n-2}) \quad (21)$$

При суммировании (операция вычисления элемента поля Галуа, отвечающего амплитуде отдельной спектральной компоненты) можно сделать перестановку

$$(\vec{w}_k, \vec{f}(1)) = f_0 \theta^k + f_1 \theta^{2k} + \dots + f_{n-2} \theta^{(n-1)k} + f_{n-1} \quad (22)$$

Вынося множитель θ^k за скобку, получаем

$$(\vec{w}_k, \vec{f}(1)) = \theta^k (w_k, f(0)) \quad (23)$$

где принято во внимание, что $\theta^k \theta^{(n-1)k} = \theta^{nk} = 1$.

Аналогичным образом,

$$(\vec{w}_k, \vec{f}(m)) = \theta^{mk} (\vec{w}_k, \vec{f}(0)) \quad (24)$$

Можно видеть, что полученная формула (24) является прямым аналогом свойства (2), присущего спектрам, вычисляемым на основе разложения сигнала по гармоническим функциям.

Данный результат показывает, что при переходе к спектрам пространственных частот, вычисляемых при представлении сигнала через поля Галуа, действительно существует

возможность обеспечить приведение спектров, снимаемых различными видеорегистраторами, к единой картине. Разумеется, сама по себе формула (24) относится только к одному преобразованию координат – преобразованию сдвига, однако, теми же средствами можно показать, что аналогичный результат справедлив и для других базовых преобразований координат на плоскости и в трехмерном пространстве (преобразование поворота, преобразование проекции и т.д.). Это достигается переходом в двух- и трехмерным обобщенным функциям Радемахера, которые могут быть получены методом алгебраических расширений, т.е. переходом от полей $GF(p)$ к полям $GF(p^2)$ и $GF(p^3)$ соответственно.

Перейдем к рассмотрению физических компонент БНС, составляющих основу систем противодействия массовым беспорядкам нового типа.

Физические компоненты боевой нейронной сети на основе ультразвуковых излучателей

Крайне негативные тренды, которые реализуются в настоящее время в мировой экономике, приводят к тому, что инициация различного рода протестных движений, создание условий для возникновения массовых беспорядков и других протестных акций становятся важным инструментом геополитической конкуренции.

Соответственно, если говорить о создании боевых нейронных сетей, то для Казахстана едва ли не первоочередной задачей является обеспечение противодействия массовым беспорядкам, причём максимально гуманными средствами, исключающими нанесение вреда здоровью протестующих (нелетальные вооружения). Нужно принимать во внимание, что для реализации своих геополитических целей иностранная агентура использует граждан Казахстана, которые могут быть в том числе и просто обманутыми. Соответственно, к ним необходимо применять максимально щадящие средства. Отсюда вытекает необходимость первоочередного применения БНС к решению задач противодействия массовым беспорядкам, причём БНС должны быть трансформированы к их нелетальной разновидности. Предпосылки для возможности их создания рассматриваются ниже.

Конкретно речь идет о том, что могут быть созданы чрезвычайно простые и дешёвые элементы БНС, которые по своим конструктивным особенностям и тактико-техническим характеристикам ненамного отличаются от тех средств, которые в настоящее время присутствуют на рынке роботизированных игр. Основная тяжесть переносится на обеспечение поражающего действия, а главное на более высокий уровень организации.

Иначе говоря, при реализации БНС главным является не столько техническая реализация отдельных компонент, сколько обеспечение эффективной работы их «мозга», то есть алгоритмических структур, обеспечивающих их функционирование как системного целого. Здесь уместно провести аналогию с главным биологическим прототипом любых нейронных систем – человеческим мозгом. Его клетки сами по себе выполняют достаточно простые функции, в то время как их совокупность как системная целостность оказывается способной не только эффективно перерабатывать информацию, но и порождать новые нетривиальные сущности, в частности – человеческое сознание.

Плодотворность предлагаемого подхода, ориентированного на массивное использование дешевых боевых систем, управляемых искусственным интеллектом, можно продемонстрировать на примере конкретной системы, которая не просто обладает заведомой практической ценностью, но и может быть реализована в ближайшее время. Конкретно речь идёт о системах противодействия массовым беспорядкам. Соответствующий вопрос

первоначально был поставлен в нашей работе [29], там же проведено сопоставление предлагаемого средства с существующими аналогами.

В данной работе подчеркивалось, что данный вопрос самым тесным образом связан с разработками нелетального оружия как такового. Речь идет о создании условий, при которых крупные скопления протестующих или крупные скопления живой силы потенциального противника могут быть рассеяны без нанесения им существенных повреждений. Наиболее перспективным (как отмечалось в цитированной работе [29]) является использование источников ультразвуковых колебаний. Однако, до последнего времени системы такого рода не были использованы на практике главным образом в силу того, что возникают более чем существенные трудности с созданием направленного ультразвукового излучения, которое бы распространялось на значительное расстояние.

С нашей точки зрения разработчики такого рода систем отталкивались от неадекватной постановки вопроса [29]. Они предполагали, что источник ультразвукового излучения должен монтироваться непосредственно на транспортном средстве или ином узле, который управляется оператором. Если же вопрос поставить иначе, а именно, создать роботизированные системы, которые могут двигаться самостоятельно и которые могут управляться дистанционно, то необходимость в создании средств, обеспечивающих узконаправленное распространение ультразвукового излучения, отпадает. Фактически в этом случае можно использовать практически любые газоструйные источники ультразвука начиная от обычных резонаторов и заканчивая такими источниками как сирены.

Принципиальным в данном отношении также является возможность использования большого количества излучателей, установленных на дешёвые передвижные платформы или иные средства доставки, которые будут создавать мощное ультразвуковое поле непосредственно в зоне контакта с объектом воздействия.

Подчеркнем еще раз, что в современных условиях борьба с массовыми беспорядками становится более чем актуальной. Волна оранжевых революций захлестывает постсоветские страны, и это создает более чем существенные как геополитические, так и экономические риски. Пример Украины, потерявшей значительную часть своего промышленного потенциала и значительную часть своего населения в результате «Революции достоинства», которая была осуществлена именно через массовые протесты, является тому наглядным свидетельством. Можно также увидеть на примере Белоруссии, что существующие средства противодействия массовым беспорядкам (такие как водометы и непосредственное силовое воздействие) не являются достаточно эффективными. Во-первых, они дороги, во-вторых, они требуют использования значительных сил и средств, привлечения личного состава спецподразделений и тому подобное.

С использованием аналога боевых нейронных сетей, но только оснащенных нелетальными средствами воздействия, такая задача может быть решена гораздо более простыми и дешевыми средствами. При условии последующей передачи рассматриваемых ниже систем в соответствующие подразделения, вопрос о противодействии массовым беспорядкам снимается автоматически. Фактические данные средства позволяют практически полностью устранить угрозу оранжевых революций в Республике Казахстан, что и определяет их актуальность.

Предлагаемое устройство (рисунок 4) включает в себя:

– газодинамические излучатели ультразвуковых колебаний (1), которые в простейшем случае могут представлять собой обычные свистки, частота генерации которых определяется их геометрическими размерами,

- емкость (2), заполненную порошком, или иной химической смесью, обеспечивающей генерацию при поджоге отходящих газов,
- капсюль (3), который обеспечивает воспламенение смеси, заполняющей емкость (2) за счет протекания электрического тока,
- емкость (4), которая обеспечивает перенаправление потока отходящих газов в одном направлении, что обеспечивает создание реактивной тяги устройства в целом за счет возникновения направленного потока отходящих газов (5),
- крепежи резонатора (6) на подвижной платформе (7),
- радиоэлектронный блок управления (8), который обеспечивает передачу команды на поджог элемента (3) по сигналу оператора.

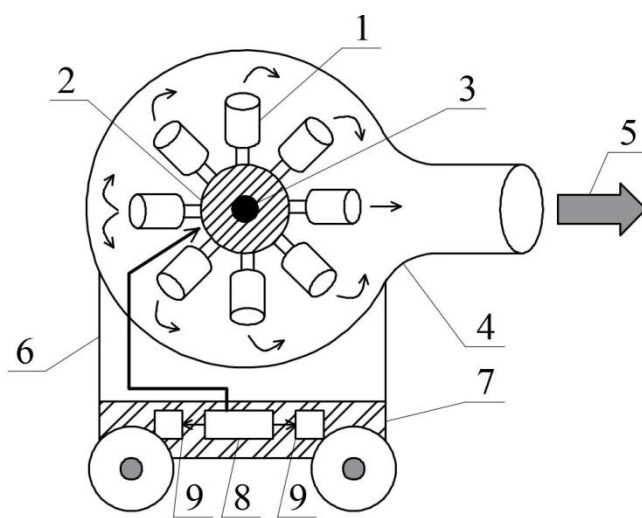


Рисунок 4 – Общая схема ультразвукового средства противодействия массовым беспорядкам

Радиоэлектронный блок управляет также элементами, обеспечивающими приведение в движение платформы, на которой крепится рассматриваемая система.

Устройство работает следующим образом. Для его перемещения в направлении объекта воздействия, например, несанкционированного митинга или иного скопления лиц, отказывающихся подчиняться законным требованиям, осуществляется перемещение системы в целом при помощи электродвигателей или любых других узлов, обеспечивающих перемещение платформы (7) в заданном направлении (могут быть использованы и беспилотные летательные аппараты). При достижении точки, начиная с которой необходимо оказать ультразвуковое воздействие на выбранный объект, по команде оператора осуществляется поджог смеси, заполняющей емкость (2) посредством элемента (3). В результате химической реакции между компонентами образуются отходящие газы, которые, проходя через газоструйные генераторы (1), обеспечивают создание мощного ультразвукового поля. Они же обеспечивают и ускоренное реактивное движение системы вперед за счёт возникающей реактивной тяги.

Другими словами, в данном случае химическая энергия веществ, заполняющих камеру (2), используется двояко – с одной стороны она обеспечивает генерацию мощного ультразвукового поля создающего условия для разгона протестующих, и в то же время обеспечивает ускоренное движение системы в заданном направлении.

Функциональная схема радиоэлектронного блока ультразвукового средства противодействия массовым беспорядкам показана на рис. 5.

Радиосигнал поступает на диодный АМ-детектор через антенну АЕ1. Детектированный сигнал подается на аналоговый вход микроконтроллера Atmega8A. Передача радиосигнала происходит при помощи передатчика АМ сигналов на основе полевых транзисторов. Схема состоит из задающего генератора на полевом транзисторе и кварцевого резонатора который задает частоту работы генератора. Амплитудно-модулированный сигнал передается по антенному тракту ANT1.

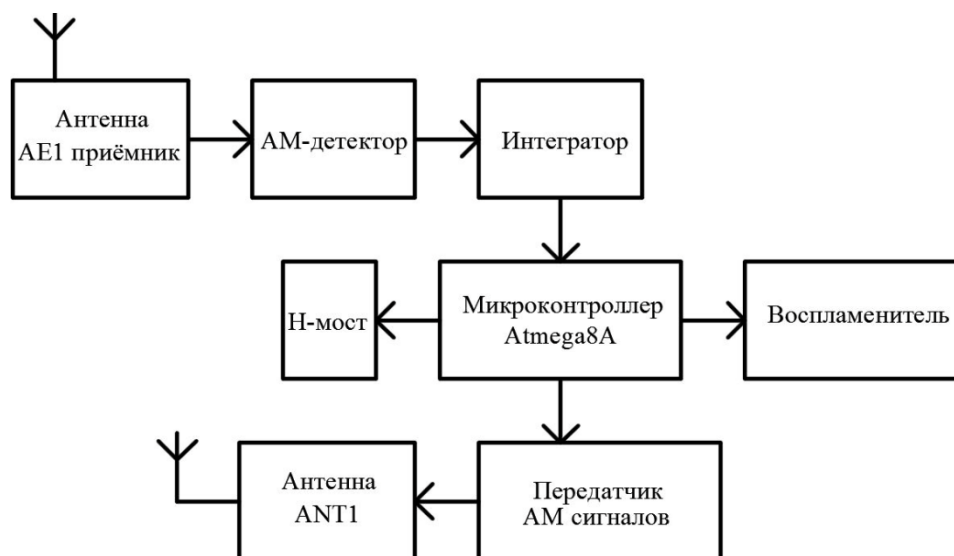


Рисунок 5 – Функциональная схема радиоэлектронного блока ультразвукового средства противодействия массовым беспорядкам

Движение устройства осуществляется при помощи Н-моста, управляемого микроконтроллером.

Реактивная система управления движением осуществляется с помощью биполярных транзисторов, работающих в режиме ключа управляемых микроконтроллером Atmega8a. При открытом канале коллектор-эмиттер, на нагревательном элементе происходит падение напряжения, тем самым данный элемент нагревается до температуры воспламенения горючего вещества.

Управление движением данного устройства осуществляется с помощью Н-моста и двигателей постоянного тока. При подаче сигнала высокого или низкого уровня с микроконтроллера на управляющие входы Н-моста двигатели вращаются вперед или назад.

Элементарные расчеты показывают, что мощности совокупности ультразвуковых свистков, установленных на одном таком подвижном дроне, достаточно для того, чтобы вызвать крайне негативную реакцию у людей, находящихся на расстоянии порядка 10 метров и более. Иными словами, использование сети дронов действительно решает поставленную задачу, особенно если принять во внимание, что протестные акции, как правило, происходят в условиях крупных городов, где передвижения дронов по мостовым является вполне реалистичным.

Отметим, что поджог пороховых газов представляет собой очень простую задачу, которая решена еще в начале XX века. Создание радиоуправляемых подвижных дронов также представляет собой более чем простую задачу, они уже давно используются в играх различного рода, представленных в том числе на рынке. Следовательно, сами по себе технические средства здесь действительно являются вторичными.

Первичным является «мозг» системы, что и заставляет обратить самое пристальное внимание на разработки в том числе, связанные с развитием систем обработки телеметрической информации, о которых говорилось в предыдущем разделе.

Заключение

Таким образом, в данной работе предложены новые подходы к решению двух ключевых задач, возникающих при создании боевых нейронных сетей – нелетальных систем противодействия массовым беспорядкам. Это – обеспечение распределенной телеметрии (сведение данных, получаемых от совокупности видеорегистраторов, случайным образом расположенных в пространстве, в единую картину) и обеспечение нелетального воздействия на скопление участников массовых беспорядков.

Физической основой предлагаемых боевых нейронных сетей являются простые и дешевые (вплоть до одноразового использования) беспилотные роботизированные системы, на которые устанавливается химический источник ультразвука (газодинамический генератор ультразвуковых колебаний, в котором поток газа образуется за счет реакции взрывного горения). Такой подход позволяет использовать источники ультразвука с произвольной диаграммой направленности, что снимает многочисленные проблемы, возникающие при попытках реализовать узконаправленный пучок. При этом роботизированные системы – носители источников ультразвука – могут быть исполнены как в наземном варианте (минитанкетки), так в форме летательных аппаратов, обладающих пониженными тактико-техническими характеристиками.

Мощность создаваемых ультразвуковых колебаний в данном случае регулируется как амплитудой газового потока, так и расстоянием от беспилотного аппарата с установленным источником ультразвука до точки воздействия (характер использования боевой нейронной сети предполагает, что воздействие, в том числе, может быть оказано несколькими аппаратами одновременно). Существенно, что мощность воздействия при использовании химических источников ультразвука может быть кратно увеличена за счет использования акустически активных сред [30], самопроизвольно возникающих в продуктах сгорания порохов и аналогичных им композиций (эффект усиления звука при прохождении через неравновесную газовую среду, в том числе, был доказан прямыми исследованиями в области физики атмосферы [31, 32]).

Управление боевой нейронной сетью обеспечивается за счет сопряженной с ней системой искусственного интеллекта, составной частью которой является система распределенной телеметрии, назначением которой является получение единой картины обстановки в зоне использования сети на основе данных, получаемых от большого количества видеорегистраторов. Такой подход параллельно позволяет осуществлять управления боевой нейронной сетью как единым целым, идентифицировать участников массовых беспорядков, осуществлять анализ их действий (в том числе в целях выявления центров управления) в режиме реального времени и т.д.

Литература:

1. Мун Г.А., Пак И.Т., Тасбулатова З.С., Бакиров А.С., Байпакбаева С.Т., Сулейменов И.Э. Инструменты противодействия современным формам ведения информационной войны в научно-технической сфере // Известия научно-технического общества «КАХАК». – 2019. – N 2 (65). – С. 38–50. ISSN-1682-0533.

2. Мун Г.А., Сулейменов И.Э. Интенсификация инновационной деятельности как социокультурная проблема // Известия научно-технического общества «КАХАК». – 2019. – N 2 (65). – С. 51–63.
3. Мун Г.А., Масалимова А.Р., Сулейменова К.И., Тасбулатова З.С., Витулёва Е.С., Сулейменов И.Э. Принципы фон Гумбольдта и реалии постсоветских университетов. Вестник КазНУ. Серия философии, культурологии и политологии. – 2019. – N 3 (69). – С. 21–30, ISSN 2617-5843 <https://doi.org/10.26577/jrcp-2019-3-p3>.
4. Сулейменов И.Э., Витулёва Е.С. К вопросу о новой парадигме высшего образования // Известия научно-технического общества «КАХАК». – 2018. – N 3 (62). – С. 86–94.
5. Сулейменов И.Э., Витулёва Е.С. Прологомены к общей теории развития телекоммуникационной индустрии // Вестник АУЭС. – Алматы: АУЭС. – 2018. – № 4 (3) (43). – С.24–32.
6. Мун Г.А., Витулёва Е.С., Байпакбаева С.Т., Кабдушев Ш.Б., Сулейменов И.Э. Проблематика постиндустриальной войны и деловые образовательные экосистемы // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. – 2020. – N 4 (78). – С. 88–93.
7. Ордин В. В., Головнев А. В. Оценка эффективности применения комплекса «носитель-планирующий транспортный контейнер-барражирующий боеприпас» // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2020. – N14. – С. 175–183
8. Ананьев А. В. Выбор способа поражения группой ударных беспилотных летательных аппаратов на основе метода анализа иерархий // Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора НЕ Жуковского и ЮА Гагарина» (г. Воронеж). Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание. – С. 8–13.
9. Гризо А. А., Невмержицкий І. М., Григор'єв В. Б., Зіняк Р.В. Оцінка ймовірності ураження наземної оглядової РЛС баражуючими боеприпасами з режимом самонаведення на радіовипромінювання // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2018. – N 1. – С. 39–46.
10. Шегельман И. Р., Васильев А. С. Краткий обзор инноваций в сфере создания беспилотной техники // Новое слово в науке: перспективы развития. – 2015. – N 2. – С. 243–244.
11. Смолин М. С., Хило Ю. С., Голиков А. М. Исследование модели системы связи для «роя» БПЛА // Электронные средства и системы управления. – 2018. – № 1-1. – С. 8–10.
12. Бондарев В. Г., Ипполитов С. В., Лопаткин Д. В. Рой ударных беспилотных летательных аппаратов // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению "Техническое зрение и распознавание образов". – 2019. – С. 116–124.
13. Харьков В. П., Халютина О. С. Инновационные технологии управления "роем" беспилотных летательных аппаратов (БЛА) // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2017. – N 1. – С. 302–309.
14. Sreenu G., Durai M. A. S. Intelligent video surveillance: a review through deep learning techniques for crowd analysis // Journal of Big Data. – 2019. – Т. 6. – №1. – С. 1–27.
15. Elhoseny M. Multi-object detection and tracking (MODT) machine learning model for real-time video surveillance systems // Circuits, Systems, and Signal Processing. – 2020. – Т. 39. – N 2. – P. 611–630.
16. Fedorov A. et al. Traffic flow estimation with data from a video surveillance camera // Journal of Big Data. – 2019. – Т. 6. – N 1. – P. 1–15.
17. Ding B., Kulkarni J., Yekhanin S. Collecting telemetry data privately // arXiv preprint arXiv:1712.01524. – 2017. – P. 1–10.
18. Buele J. et al. Telemetry and Video Surveillance System in a UAV for the Control and Monitoring of Long-Distance Missions // International Conference on Computational Science and Its Applications. – Cham.: Springer. – 2020. – P. 666-681.
19. Nasir M. et al. Fog computing enabled cost-effective distributed summarization of surveillance videos for smart cities // Journal of Parallel and Distributed Computing. – 2019. – Т. 126. – P. 161–170.

20. Mandelli S. et al. Blind detection and localization of video temporal splicing exploiting sensor-based footprints // 2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). – IEEE. – 2018. – P.1362–1366.
21. Yang J. et al. 3D panoramic virtual reality video quality assessment based on 3D convolutional neural networks // IEEE Access. – 2018. – Т. 6. – P. 38669-38682.
22. Goodman J.W., Cox M.E. Introduction to Fourier Optics // Physics Today. – 1969. – N 22 – P. 97–101.
23. Suleimenov I., Tolmachev Y. On the possibility of generalization of Fourier optics // Optics and spectroscopy. –1994. – N 76. – P. 893-898.
24. Suleimenov I., Tolmachev Y. Generalized Fourier optics. Reflection of monochromatic radiation from mirrors of arbitrary shape // Optics and spectroscopy. – 1994. – N 77. – P. 119–124.
25. Dutkay D.E., Picioroaga G. Generalized Walsh Bases and Applications // Acta Applicandae Mathematicae. – 2013. – Vol. 133, N 1. – P. 1–18.
26. Huang, Q. et al., "Low-complexity encoding of quasi-cyclic codes based on Galois Fourier transform," IEEE Transactions on Communications. – 2014. – N 62(6). – P. 1757–1767.
27. Moldakhan I., Matrassulova D. K., Shaltykova D.B., Suleimenov I.E. Some advantages of non-binary Galois fields for digital signal processing // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2021. – Vol. 23. – N 2. – P. 871– 887.
28. Vitulyova E. S., Matrassulova D.K., Suleimenov I.E., Application of Non-binary Galois Fields Fourier Transform for Digital Signal Processing: to the Digital Convolution Theorem // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2021. – Vol. 23. – N 3. – P. 1718-1726.
29. Мун Г.А., Витулёва Е.С., Тасбулатова З.С., Байпакбаева С.Т., Сулейменов И. Э. Системы противодействия массовым беспорядкам на основе новых физико-химических принципов // Вестник КазНУ. – 2019. – N 5(135). – С. 548–553.
30. Suleimenov I., Aushev V., Adamov T., Vasiliev I. The influence of inhomogeneous temperature distribution on the amplification of sound waves in non-equilibrium gas media // In 35th COSPAR Scientific Assembly. – 2014. – N 35. – P. 2096.
31. Suleimenov I.E., Aushev V.M., Tulebekov E.A., Antoshchuk I.A. Effect of resonance phenomena on the wave structure of the middle atmosphere // Geomagnetism and Aeronomy. – 2006. – N 46(3). – P.371–381.
32. Molevich N., Riashchikov D. Shock wave structures in an isentropically unstable heat-releasing gas// Physics of Fluids. – 2021. – Vol. 33(7). – P. 076110.

References:

1. Mun G.A., Pak I.T., Tasbulatova Z.S., Bakirov A.S., Bajpakbaeva S.T., Sulejmenov I.Je. Instrumenty protivodejstviya sovremennym formam vedeniya informacionnoj vojny v nauchno-tehnicheskoy sfere // Izvestiya nauchno-tehnicheskogo obshhestva «КАХАК». – 2019. – N 2 (65). – S. 38–50. ISSN-1682-0533.
2. Mun G.A., Sulejmenov I.Je. Intensifikacija innovacionnoj dejatel'nosti kak sociokul'turnaja problema // Izvestiya nauchno-tehnicheskogo obshhestva «КАХАК». – 2019. – N 2 (65). – S. 51–63.
3. Mun G.A., Masalimova A.R., Sulejmenova K.I., Tasbulatova Z.S., Vituljova E.S., Sulejmenov I.Je. Principy fon Gumbol'dta i realii postsovetских universitetov. Vestnik KazNU. Seriya filosofii, kul'turologii i politologii. – 2019. – N 3 (69). – S. 21-30, ISSN 2617-5843 <https://doi.org/10.26577/jpcp-2019-3-p3>
4. Sulejmenov I.Je., Vitulëva E.S. K voprosu o novej paradigme vysshego obrazovaniya // Izvestiya nauchno-tehnicheskogo obshhestva «КАХАК». – 2018. – N 3 (62). – S. 86–94.
5. Suleimenov I.Je., Vitulëva E.S. Prolegomeny k obshhej teorii razvitija telekommunikacionnoj industrii // Vestnik AUJeS. – Almaty: AUJeS. – 2018. – № 4 (3) (43). – S.24–32.
6. Mun G.A., Vituljova E.S., Bajpakbaeva S.T., Kabdushev Sh.B., Sulejmenov I.Je. Problematika postindustrial'noj vojny i delovye obrazovatel'nye jekosistemy // Vestnik Nacional'noj inzhenernoj akademii Respubliki Kazahstan. – 2020. – N 4 (78). – S. 88–93.

7. Ordin V.V., Golovnev A.V. Ocenka jeffektivnosti primenenija kompleksa «nositel'-planirujushhij transportnyj kontejner-barrazhirujushhij boepripas» //Vozdushno-kosmicheskie sily. Teorija i praktika. – 2020. – N14. – S. 175–183
8. Anan'ev A.V. Vybor sposoba porazhenija gruppoj udarnyh bespilotnyh letatel'nyh apparatov na osnove metoda analiza ierarhij // Voennyj uchebno-nauchnyj centr Voенno-vozdushnyh sil «Voенno-vozdushnaja akademija imeni professora NE Zhukovskogo i JuA Gagarina» (g. Voronezh). Aktual'nye voprosy issledovanij v avionike: teorija, obsluzhivanie. – S. 8–13.
9. Grizo A.A., Nevmerzhič'kij I.M., Grigor'ev V.B., Zinjak R.V. Ocinka jmovirnosti urazhennja nazemnoї ogljadovoї RLS barazhujuchimi boepripasami z rezhimom samonavedennja na radioviprominjuvannja. Nauka i tehnika Povitranjnih Sil Zbrojnih Sil Ukraїni. – 2018. – N 1. – S. 39–46.
10. Shegel'man I. R., Vasil'ev A. S. Kratkij obzor innovacij v sfere sozdanija bespilotnoj tehniki // Novoe slovo v nauke: perspektivy razvitija. – 2015. – N 2. – S. 243–244.
11. Smolin M. S., Hilo Ju. S., Golikov A. M. Issledovanie modeli sistemy svjazi dlja «roja» BPLA // Jelektronnye sredstva i sistemy upravlenija. – 2018. – № 1-1. – S. 8–10.
12. Bondarev V. G., Ippolitov S. V., Lopatkin D. V. Roj udarnyh bespilotnyh letatel'nyh apparatov //Sostojanie i perspektivy razvitija sovremennoj nauki po napravleniju" Tehničeskoe zrenie i raspoznavanje obrazov". – 2019. – S. 116–124.
13. Har'kov V. P., Haljutina O. S. Innovacionnye tehnologii upravlenija" roem" bespilotnyh letatel'nyh apparatov (BLA) //Innovacionnye, informacionnye i kommunikacionnye tehnologii. – 2017. – N 1. – S. 302–309.
14. Sreenu G., Durai M. A. S. Intelligent video surveillance: a review through deep learning techniques for crowd analysis //Journal of Big Data. – 2019. – T. 6. – №1. – S. 1–27.
15. Elhoseny M. Multi-object detection and tracking (MODT) machine learning model for real-time video surveillance systems //Circuits, Systems, and Signal Processing. – 2020. – T. 39. – N 2. – P. 611–630.
16. Fedorov A. et al. Traffic flow estimation with data from a video surveillance camera //Journal of Big Data. – 2019. – T. 6. – N 1. – P. 1–15.
17. Ding B., Kulkarni J., Yekhanin S. Collecting telemetry data privately //arXiv preprint arXiv:1712.01524. – 2017. – P. 1–10.
18. Buele J. et al. Telemetry and Video Surveillance System in a UAV for the Control and Monitoring of Long-Distance Missions //International Conference on Computational Science and Its Applications. – Cham.: Springer. – 2020. – P. 666-681.
19. Nasir M. et al. Fog computing enabled cost-effective distributed summarization of surveillance videos for smart cities //Journal of Parallel and Distributed Computing. – 2019. – T. 126. – P. 161–170.
20. Mandelli S. et al. Blind detection and localization of video temporal splicing exploiting sensor-based footprints // 2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). – IEEE. – 2018. – P.1362–1366.
21. Yang J. et al. 3D panoramic virtual reality video quality assessment based on 3D convolutional neural networks //IEEE Access. – 2018. – T. 6. – P. 38669-38682.
22. Goodman J.W., Cox M.E. Introduction to Fourier Optics // Physics Today. – 1969. – N 22 – P. 97–101.
23. Suleimenov I., Tolmachev Y. On the possibility of generalization of Fourier optics // Optics and spectroscopy. –1994. – N 76. – P. 893-898.
24. Suleimenov I., Tolmachev Y. Generalized Fourier optics. Reflection of monochromatic radiation from mirrors of arbitrary shape // Optics and spectroscopy. – 1994. – N 77. – P. 119–124.
25. Dutkay D.E., Picioroaga G. Generalized Walsh Bases and Applications // Acta Applicandae Mathematicae. – 2013. – Vol. 133, N 1. – P. 1–18.
26. Huang, Q. et al., "Low-complexity encoding of quasi-cyclic codes based on Galois Fourier transform," IEEE Transactions on Communications. – 2014. – N 62(6). – P. 1757–1767.

27. Moldakhan I., Matrassulova D. K., Shaltykova D.B., Suleimenov I.E. Some advantages of non-binary Galois fields for digital signal processing // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2021. – Vol. 23. – N 2. – P. 871– 887.
28. Vitulyova E. S., Matrassulova D.K., Suleimenov I.E., Application of Non-binary Galois Fields Fourier Transform for Digital Signal Processing: to the Digital Convolution Theorem // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2021. – Vol. 23. – N 3. – P. 1718-1726.
29. Mun G.A., Vituljova E.S., Tasbulatova Z.S., Bajpakbaeva S.T., Sulejmenov I. Je. Sistemy protivodejstvija massovym besporjadkam na osnove novyh fiziko-himicheskikh principov // Vestnik KazNITU. – 2019. – N 5(135). – S. 548–553.
30. Suleimenov I., Aushev V., Adamov T., Vasiliev I. The influence of inhomogeneous temperature distribution on the amplification of sound waves in non-equilibrium gas media // In 35th COSPAR Scientific Assembly. – 2014. – N 35. – P. 2096.
31. Suleimenov I.E., Aushev V.M., Tulebekov E.A., Antoshchuk I.A. Effect of resonance phenomena on the wave structure of the middle atmosphere // Geomagnetism and Aeronomy. – 2006. – N 46(3). – P.371–381.
32. Molevich N., Riashchikov D. Shock wave structures in an isentropically unstable heat-releasing gas// Physics of Fluids. – 2021. – Vol. 33(7). – P. 076110.

Поступила 10 ноября 2021 г.

МРНТИ 50.43.31

УДК 004.421

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ УМНОГО ДОМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С ИК-ДАТЧИКА

Лим С.С., Коккоз М.М.

Карагандинский Технический Университет, Караганда, Республика Казахстан
e-mail: limstanislav1@gmail.com, makhabbat_k@bk.ru

Данное исследование направлено на разработку и внедрение системы домашней безопасности с возможностью обнаружения человека. Традиционная система домашней безопасности, то есть система видеонаблюдения (CCTV), может только транслировать и записывать видео, не имея возможности давать предупреждающий ответ в случае обнаружения какого-либо подозрительного объекта. Следовательно, требуется дополнительный метод обнаружения и предупреждения объектов, в случае проникновения в защищаемое помещение злоумышленника. Предлагаемый дизайн реализован с использованием Raspberry Pi 3 и Arduino, которые подключаются кабелем USB. Инфракрасный датчик движения (PIR) устанавливается на Arduino, а веб-камера - на Raspberry Pi 3. Raspberry Pi 3 используется для обработки входных данных от полученных датчиков и обработки изображений для обнаружения человека. Датчик PIR обнаруживает движение вокруг датчика, чтобы активировать веб-камеру для захвата изображения. Затем выполняется распознавание объекта с использованием гистограммы градиента (HoG) и машины опорных векторов (SVM) для обнаружения подозрительного объекта. При обнаружении подозрительного объекта включается сигнализация, чтобы предупредить хозяина дома о существовании злоумышленника. Результаты оценки показывают, что предлагаемая система обнаруживает злоумышленника в среднем за 2 секунды. Это также показывает, что система может успешно обнаружить злоумышленника с точностью до 89 %.

Ключевые слова: Raspberry Pi, Arduino, интернет вещей (IoT), датчик движения (PIR), OpenCV, HOG, SVM.

Бұл зерттеу адамды анықтау мүмкіндігімен үй қауіпсіздігі жүйесін әзірлеуге және енгізуге бағытталған. Үй қауіпсіздігінің дәстүрлі жүйесі, яғни бейнебақылау жүйесі (CCTV) кез-келген күдікті объект табылған жағдайда ескерту жауабын бере алмай, тек бейнені тарата және жаза алады. Сондықтан, шабуылдаушының қорғалған бөлмесіне кіру жағдайында объектілерді анықтау мен ескертудің қосымша әдісі қажет. Ұсынылған дизайн USB кабелімен қосылған Raspberry Pi 3 және Arduino көмегімен жүзеге асырылады. Инфрақызыл қозғалыс сенсоры (PIR) Arduino-да, ал Веб-камера Raspberry Pi 3-те орнатылған. Raspberry Pi 3 алынған сенсорлардың кірістерін өңдеу және адамды анықтау үшін суреттерді өңдеу үшін қолданылады. PIR сенсоры суретке түсіру үшін Веб-камераны іске қосу үшін сенсордың айналасындағы қозғалысты анықтайды. Содан кейін күдікті нысанды анықтау үшін градиент гистограммасын (HoG) және тірек векторлық машинаны (SVM) қолдана отырып нысанды тану жүзеге асырылады. Егер күдікті зат табылса, үй иесіне қаскүнемнің бар екендігі туралы ескерту үшін дабыл қосылады. Бағалау нәтижелері ұсынылған жүйе шабуылдаушыны орташа есеппен 2 секундта анықтайтындығын көрсетеді. Сондай-ақ, бұл жүйе шабуылдаушыны 89 % дәлдікпен сәтті анықтай алатындығын көрсетеді.

Түйінді сөздер: таңқурай Pi, Arduino, интернет заттары (IoT), motion sensor (PIR), OpenCV, HOG, SVM.

This research is aimed at developing and implementing a home security system with the ability to detect a person. A traditional home security system, that is, a video surveillance system (CCTV), can only broadcast and record video, without being able to give a warning response in case of detection of any suspicious object. Therefore, an additional method of detecting and warning objects is required, in the event of an intruder entering the protected room. The proposed design is implemented using Raspberry Pi 3 and Arduino, which are connected by a USB cable. The infrared motion sensor (PIR) is installed on the Arduino, and the webcam is installed on the Raspberry Pi 3. Raspberry Pi 3 is used to process input data from the received sensors and image processing for human detection. The PIR sensor detects movement around the sensor to activate the webcam to capture the image. The object is then recognized using a gradient histogram (HoG) and a support vector machine (SVM) to detect a suspicious object. When a suspicious object is detected, an alarm is activated to warn the owner of the house about the existence of an attacker. The evaluation results show that the proposed system detects an attacker in an average of 2 seconds. It also shows that the system can successfully detect an attacker with an accuracy of up to 89%.

Keywords: *Raspberry Pi, Arduino, Internet of Things (IoT), қозғалыс сенсоры (PIR), OpenCV, HOG, SVM.*

Введение. Дом – это недвижимость, актив, а также место для хранения материальных ценностей. Таким образом, безопасность становится одним из обязательных факторов защиты дома от нежелательных событий или несчастных случаев. Традиционное решение для охраны дома - система видеонаблюдения (CCTV). Видеонаблюдение — это устройство или система устройств для наблюдения в или за пределами офиса, дома и здания. Есть некоторые проблемы с внедрением системы видеонаблюдения. Во-первых, оно не выдает никаких уведомлений и предупреждений всякий раз, когда обнаружен какой-либо подозрительный объект. Во-вторых, видеонаблюдение ведет непрерывную потоковую передачу, чтобы фиксировать события, происходящие в домашней среде, даже когда нет никаких подозрительных объектов или действий. Следовательно, это приводит к огромному потреблению полосы пропускания и носителей из-за непрерывной потоковой передачи и хранения видео [1].

Интернет вещей (IoT) — это сеть взаимосвязанных электронных устройств, способных передавать данные без помех или с минимальным вмешательством человека. Эта технология широко используется в приложениях умного города, здравоохранении, производстве и использовании в частном порядке. На сегодняшний день создается все больше разработок систем мониторинга безопасности на основе концепции IoT. Они используют возможности датчика, например, пассивный инфракрасный датчик движения (PIR), датчик открытия двери, датчик разбития стекла для отслеживания возникновения любой подозрительной активности. Такого рода системы также оснащаются механизмом обратной связи, чтобы предупредить владельца дома, если в его дом проникнет злоумышленник. В целом эта технология обеспечивает лучшую защиту по сравнению с традиционным видеонаблюдением.

В этой статье предлагается система IoT для отслеживания присутствия злоумышленника в доме с помощью комбинации обнаружения движения и распознавания объектов. Обнаружение движения осуществляется с помощью датчика PIR. После обнаружения движения объекта веб-камера делает снимок подозрительного места. Затем система выполняет распознавание объектов, используя гистограмму градиента (HOG) и методы вспомогательной векторной машины (SVM). Наконец, ожидается, что система распознает появление злоумышленника и предупредит владельца дома с помощью сигнала тревоги.

Система реализована на Raspberry Pi 3 и Arduino. Оценка системы включает измерение точности и задержки распознавания злоумышленника. Ожидается, что система точно распознает злоумышленника в кратчайшие сроки.

Структура статьи разделена на пять разделов. В разделе существующие разработки обсуждаются проекты, сделанные исследователями в этой области. Раздел описывает подход к проектированию системы. В следующем разделе представлены результаты оценки эффективности и их обсуждение. Наконец, в последнем разделе подводятся итоги этого исследования.

Существующие разработки

Ранее были проведены некоторые исследования системы домашней безопасности.

Первое исследование было проведено с заголовком статьи «Система оповещения безопасности на основе Интернета вещей для умного дома». В нем описываются недорогие системы домашней безопасности, использующие инфракрасный порт (PIR) и модули Raspberry Pi для минимизации задержек при оповещениях по электронной почте. Поэтому есть датчики PIR в качестве обнаружения движения и Raspberry Pi в качестве его модуля обработки [2].

Во-вторых, было проведено исследование под названием «Проектирование и внедрение систем безопасности для умного дома на основе технологии GSM». Данный проект предлагает два метода для домашних систем безопасности, которые реализованы в одном приложении. Первая система использует веб-камеру, которая удобна для захвата движения и объектов, предупреждающих звуков и отправки отзывов пользователю. Второй способ – отправка SMS с использованием модуля GSM-GPS Module (sim548c) и микроконтроллера Atmega644p, датчика, реле и звукового оповещателя (зуммера) [3].

Исходя из существующих разработок, которые обсуждались, можно сделать вывод, что нет технологии IoT для домашней безопасности с дополнительной возможностью распознавания злоумышленника.

Подход к проектированию системы

Исходя из возникших проблем, предлагается система IoT с дополнительной возможностью обнаружения и распознавания злоумышленника, с использованием методов HOG и SVM. Система реализована на Raspberry Pi 3 и Arduino. Использование Raspberry Pi 3 объясняется тем, что эта плата может обрабатывать изображения с низким энергопотреблением от компьютера и ноутбука. Arduino используется для интеграции всех электронных устройств в одну среду. Для обнаружения движения используется датчик инфракрасный датчик движения (PIR). В данном разделе мы обсуждаем подход к проектированию предлагаемой системы домашней безопасности.

Общий дизайн системы

При проектировании системы первым шагом является разработка архитектуры системы. Во-первых, нам необходимо рассмотреть сценарий возможного проникновения злоумышленника и сценарий того, как будет осуществляться оповещение о проникновении. Возможный сценарий злоумышленника можно увидеть на рисунке 1. Предполагается, что злоумышленник входит в дом через входную дверь. С момента проникновения злоумышленника датчик PIR, расположенный рядом с входной дверью, является первым компонентом, который активируется при обнаружении движения. Датчик PIR считывает

каждое движение, которое проходит через его диапазон обнаружения, то есть примерно 5–7 метров. В процессе обнаружения движения система будет непрерывно считывать данные, пока не будет обнаружено движение.

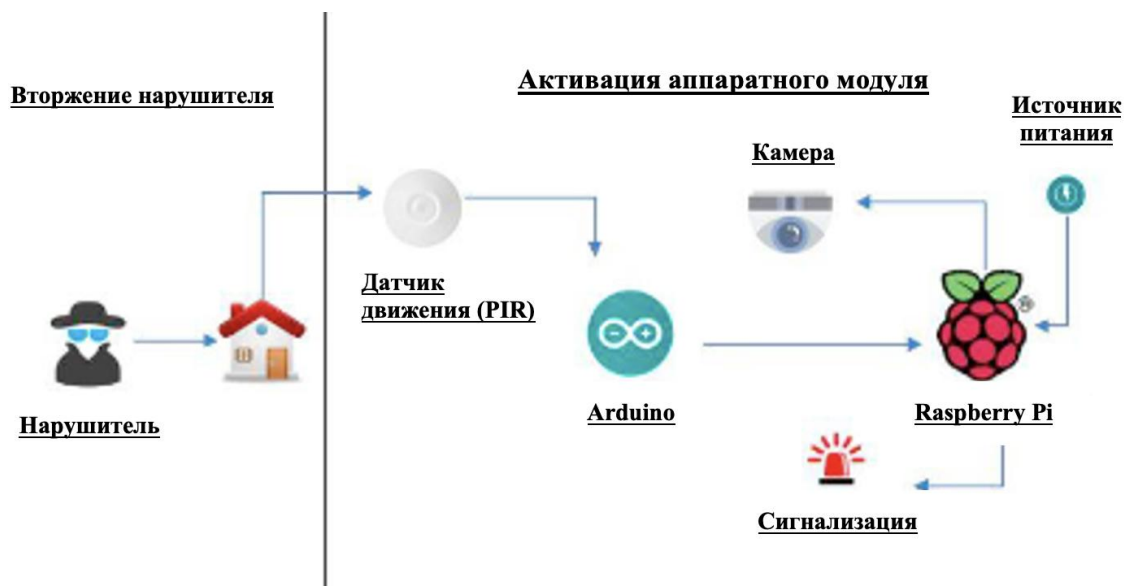


Рисунок 1 – предлагаемая системная архитектура

Если есть движение, система активирует камеру. Полученные изображения затем сохраняются в системном каталоге. После процесса захвата и хранения фотографий система активирует функцию обнаружения человека. При обнаружении людей мы используем методы HOG и SVM. Элементы фотографии извлекаются с помощью HOG, а затем выполняется классификация элементов с помощью SVM. SVM сопоставляет характеристики фотографий с характеристиками в наборе данных. Если на фотографии присутствует человек, система активирует звуковой оповещатель (зуммер) как сигнал тревоги. Если на изображении нет человека, система перечитывает движение или вернется к исходному процессу. Полный рабочий процесс системы представлен в качестве псевдокода на рисунке 2.

Аппаратный дизайн

В этом разделе мы обсудим конструкцию оборудования системы безопасности. Дизайн оборудования включает в себя выбор устройств и интеграцию всех компонентов. На рисунке 3 показана конструкция оборудования для системы мониторинга безопасности. В то время, как спецификации каждого компонента определены в таблице 1. Номер на рисунке 3 соответствует порядку компонентов в таблице 1. Для модуля обработки мы используем Raspberry Pi 3 модель B [4]. Эта плата оснащена модулем беспроводной локальной сети для связи. Arduino используется для сбора сигнала от датчика PIR через соединительный кабель [5]. Arduino подключается к Raspberry Pi через USB-кабель. Для захвата изображения веб-камера подключается к Raspberry Pi 3 через USB-кабель. Для вывода предупреждения модуль зуммера подключается к Raspberry Pi 3 через порт GPIO [6].

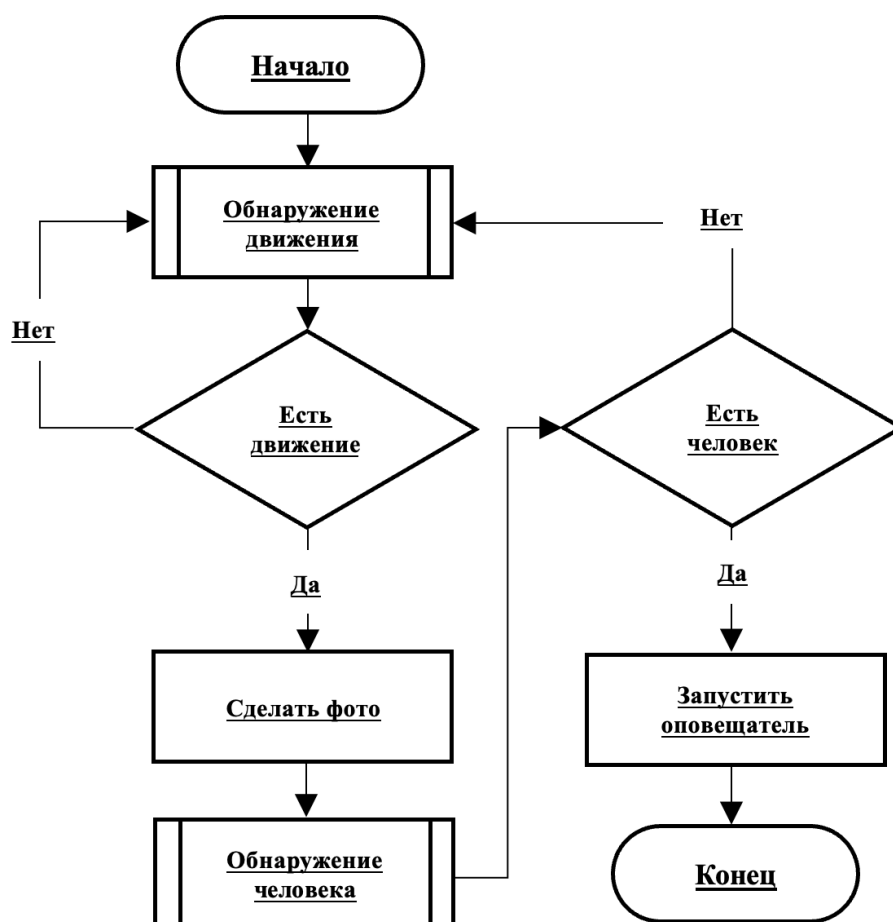


Рисунок 2 – Процесс работы системы безопасности

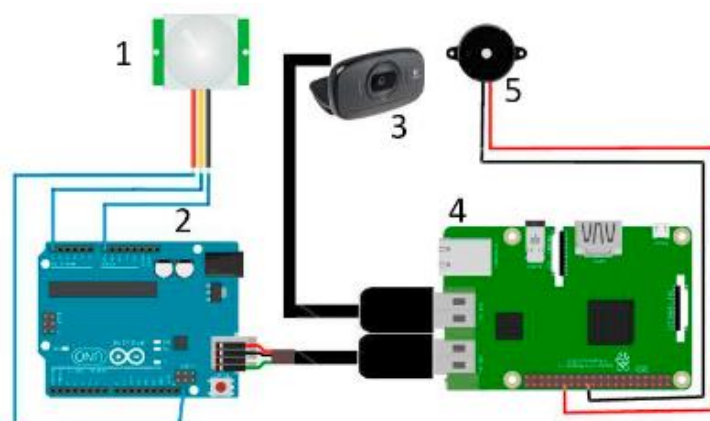


Рисунок 3 – Архитектура аппаратной части

Разработка программного обеспечения

После проектирования и сборки оборудования осуществляется проектирование программного обеспечения. Во-первых, мы делаем диаграмму вариантов использования, как показано на рисунке 4. Пользователь начинает активировать систему в Raspberry Pi 3. Обнаружение движения обрабатывается датчиком PIR и Arduino отправляет значение true или false в Raspberry Pi 3. После положительного знания, отправленного с Arduino на

Raspberry Pi 3 посылается управляющая команда для съемки веб-камерой. Фотография сделана. срабатывает после отправки данных Arduino. управляет камерой.

Таблица 1 – Компоненты системы мониторинга безопасности

№	Наименование	Описание
1	Датчик движения PIR	Датчик для обнаружения движения
2	Arduino	Arduino UNO
3	Камера	Использование веб-камеры с USB 2.0 (Logitech c525) для съемки изображений
4	Raspberry Pi	Использование Raspberry Pi 3 Model B, ARM Cortex-A53 1.2 ГГц, 1 Гб ОЗУ, беспроводная сеть 802.11n. В данное устройство была загружена библиотека обработки изображений OpenCV.
5	Оповещатель	Пассивный оповещатель для сигнализации



Рисунок 4 – Диаграмма вариантов использования

Для обнаружения злоумышленников в Raspberry Pi 3 установлены гистограмма градиентов (HOG) [7] и метода опорных векторов (SVM) [8]. HOG используется для извлечения характеристик человека, как объекта отслеживания на изображении. На первом этапе метод HOG преобразует изображение с формата RGB (красный, зеленый, синий) в оттенки серого. Затем выполняется гамма-нормализация, чтобы вычислить результат квадратного корня для каждого канала (красного, зеленого и синего). Затем значение

градиента каждого пикселя будет вычислено путем деления его на ячейки 8 на 8. Следующий этап - определить номер ячейки ориентации, которая будет использоваться в гистограмме (биннинг пространственной ориентации). После этого будет произведен процесс нормализации блока 16 на 16 ячеек для преодоления изменений освещения. В этом процессе есть блоки, которые перекрываются из-за их смещения ячеек. Последний процесс - вычислить вектор признаков HOG. Результирующая функция HOG будет обработана с использованием метода SVM, чтобы определить, является ли функция функцией человека или нет. Полный процесс обнаружения человека можно увидеть на рисунке 5 [9].

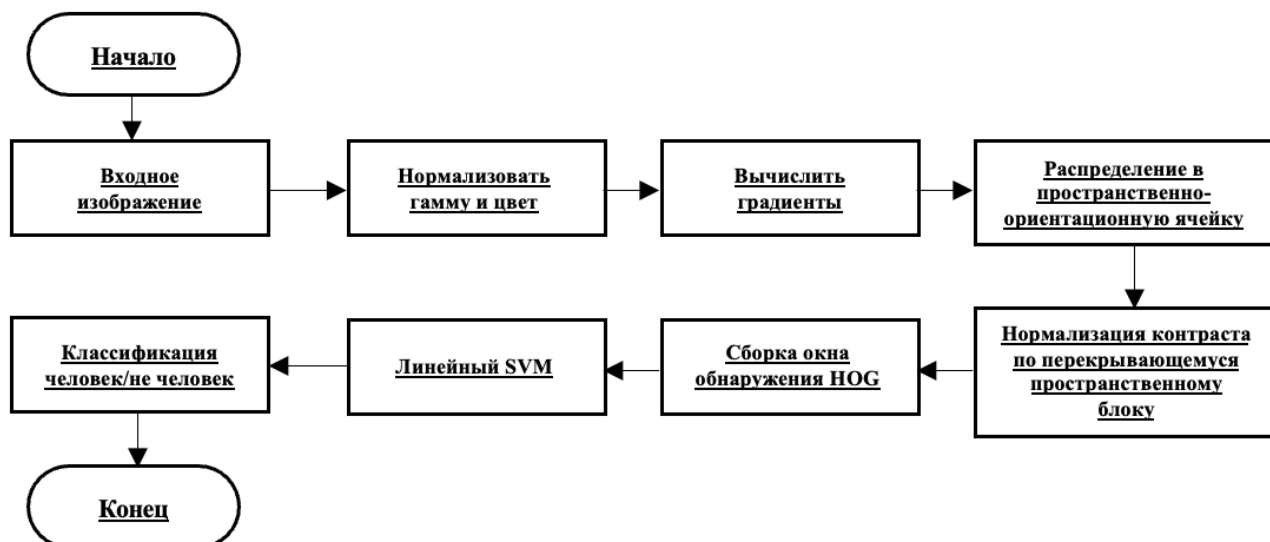


Рисунок 5 – Процесс обнаружения человека

Результаты оценки эффективности и их обсуждение

В этом разделе обсуждается результат реализации системы мониторинга безопасности IoT. Во-первых, была интегрирована и реализована спроектированная система, в которой показано соединение между Arduino и ИК-датчиком (PIR) (рисунок 6), соединение между Arduino и Raspberry Pi 3 (рисунок 7) и соединение между Raspberry Pi 3 с зуммером и веб-камерой (рисунок 8).



Рисунок 6 – Результат подключения ИК-датчика к Arduino

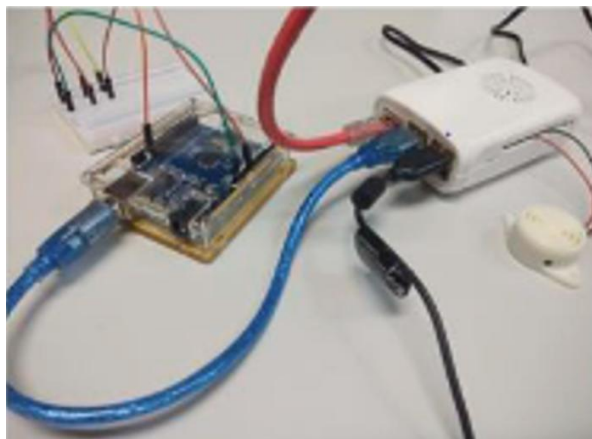


Рисунок 7 – Результат подключения Arduino к Raspberry Pi 3



Рисунок 8 – Результат подключения Raspberry Pi 3 к зуммеру и веб-камере

На рисунке 9 показан эскиз экспериментального помещения, в котором была установлена система безопасности. Возможный вход в помещение может осуществляться через дверь и окно. Датчик PIR и камера расположены перед дверью, как показано на рисунке. Сценарий работы описывается следующим образом:

1. Сначала активируется систему, злоумышленник открывает дверь и входит в комнату.
2. Система обнаруживает движение злоумышленника и фотографирует злоумышленника.
3. Система анализирует наличие злоумышленника и включает зуммер.

Этот сценарий повторяется 100 раз в экспериментах с различными состояниями злоумышленника. Например, когда злоумышленник несет украденную вещь, стоит наполовину, повернут наполовину, повернут спиной и т. д., как показано на рисунке 10. В этой оценке мы измеряем два параметра. Первый параметр касается времени обработки обнаружения злоумышленника. Второй параметр - точность обнаружения злоумышленника.

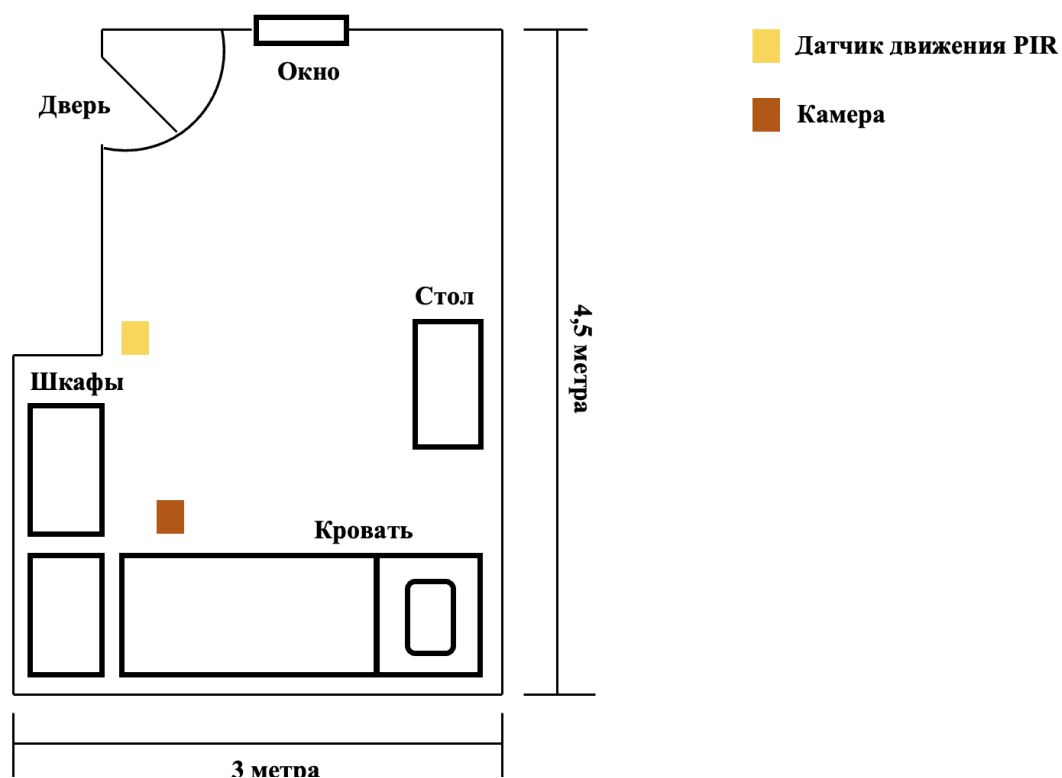


Рисунок 9 – Тестируемое помещение



Рисунок 10 – Результат захвата изображений

На рисунке 11 показан результат времени обработки изображения. Ось абсцисс указывает индекс эксперимента (общее количество экспериментов составляет 100 раз), а ось ординат указывает измеренное время в секундах. Синяя линия указывает время для съемки. Это означает, что время, отсчитываемое от датчика ИК-датчика, определяет движение, пока не будет сделана фотография. Красная линия указывает время обнаружения человека. Это означает, что время начинается с момента фотографирования, системного анализа картинки, до принятия решения. Результат показывает, что среднее время съемки составляет 0,924 секунды, а среднее время обнаружения злоумышленника – 1,083 секунды. Таким образом, общее время от обнаружения движения до обнаружения изображения злоумышленника составляет 2,007 секунды. По результатам измерения времени обработки можно сказать, что система способна обезопасить дом, поскольку она может обнаружить злоумышленника в течение нескольких секунд.

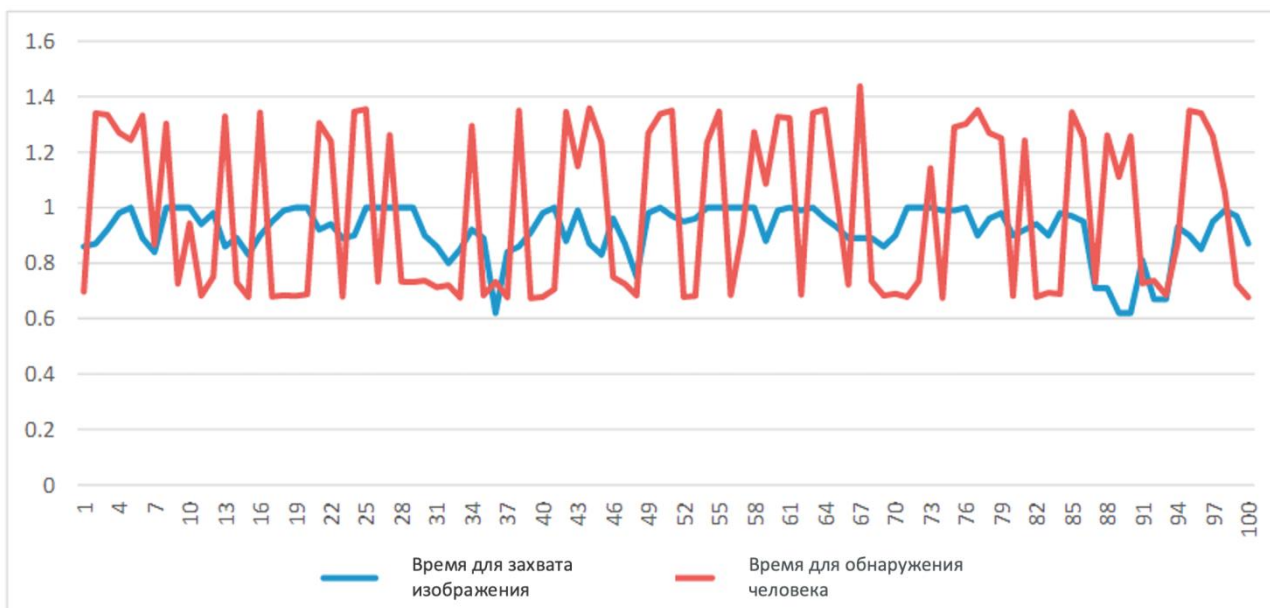


Рисунок 11 – Время обработки изображения

Затем оценивается точность процесса обнаружения человека. В результате эксперимента получается 100 фотографий. По фотографиям определяется наличие людей на снимке. По результатам проверки 89 изображений были успешно обнаружены, остальные 11 нет. Примеры изображений успешного обнаружения можно увидеть на рисунке 10. На них люди различаются на контрастном цвете фона, таким как стена и дверь. Таким образом, система может легко обнаружить людей на этих фотографиях. Неудачное обнаружение (рисунок 12) можно увидеть, когда объект перекрывает силуэт человека, либо, когда цвет фона менее контрастный. В таком случае система не может точно определить силуэт человека. По этому результату мы можем оценить, что система имеет хорошую точность в обнаружении злоумышленника, однако следует исключить возможность неудачного обнаружения, чтобы повысить точность до 100 % уже будущих исследованиях.



Рисунок 12 – Пример изображений со сбоями в работе

Заключение

В статье была предложена система мониторинга безопасности, основанная на технологии IoT. Данная система состояла из Raspberry Pi 3, Arduino, датчика ИК-датчика движения (PIR), веб-камеры и зуммера. Отличительной особенностью системы является включение возможности обнаружения человека методами HoG, SVM и зуммера в качестве системы

оповещения владельца. Результат моделирования показывает, что система может обнаружить злоумышленника за секунды с точностью 89 %. В будущих исследованиях планируется изучить другие методы выделения и классификации объектов для повышения точности обнаружения злоумышленников.

Литература:

1. Bangali J., Shaligram A. Design and Implementation of Security Systems for Smart Home based on GSM technology. // International Journal of Smart Home. – 2013. – Vol. 7. – N 6. – P. 201–208.
2. Mayur J., Ramesh V., Nisha P. A Study of Motion Detection Method for Smart Home System. // International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering. – 2014. – Vol. 1. – N 5. – P. 148–151.
3. Chitnis S., Deshpande N., Shaligram A. An Investigative Study for Smart Home Security: Issues, Challenges and Countermeasures // Wireless Sensor Network. – 2016. – Vol. 8. – № 4. – P. 61–68.
4. Raspberry Pi 3 Model B. Инструкция по эксплуатации // Электронный ресурс: <https://m.fotosklad.ru/upload/iblock/00d/00d91d33a35cc734b52eefd835a1bc57.pdf>.
5. How PIRs Work // Электронный ресурс: <https://learn.adafruit.com/pir-passive-infrared-proximity-motion-sensor/how-pirs-work>.
6. Подключение Raspberry Pi к Arduino через UART интерфейс // Электронный ресурс: <https://volti.ru/raspberry-pi-arduino-serial-communication>.
7. Урок 2. Гистограмма направленных градиентов с использованием OpenCV // Электронный ресурс: <https://waksoft.susu.ru/2021/11/01/histogram-of-oriented-gradients>.
8. Краткий обзор алгоритма машинного обучения Метод Опорных Векторов (SVM) // Электронный ресурс: <https://habr.com/ru/post/428503>.
9. Raspberry Pi Face Recognition // Электронный ресурс: <https://pyimagesearch.com/2018/06/25/raspberry-pi-face-recognition>.

References:

1. Bangali J., Shaligram A. Design and Implementation of Security Systems for Smart Home based on GSM technology. // International Journal of Smart Home. – 2013. – Vol. 7. – N 6. – P. 201–208.
2. Mayur J., Ramesh V., Nisha P. A Study of Motion Detection Method for Smart Home System. // International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering. – 2014. – Vol. 1. – N 5. – P. 148–151.
3. Chitnis S., Deshpande N., Shaligram A. An Investigative Study for Smart Home Security: Issues, Challenges and Countermeasures // Wireless Sensor Network. – 2016. – Vol. 8. – № 4. – P. 61–68.
4. Raspberry Pi 3 Model B. Инструкция по эксплуатации // Электронный ресурс: <https://m.fotosklad.ru/upload/iblock/00d/00d91d33a35cc734b52eefd835a1bc57.pdf>.
5. How PIRs Work // Электронный ресурс: <https://learn.adafruit.com/pir-passive-infrared-proximity-motion-sensor/how-pirs-work>.
6. Podklyuchenie Raspberry Pi k Arduino cherez UART interfejs // Jelektronnyj resurs: <https://volti.ru/raspberry-pi-arduino-serial-communication>
7. Urok 2. Gistogramma napravlennyh gradientov s ispol'zovaniem OpenCV // Jelektronnyj resurs: <https://waksoft.susu.ru/2021/11/01/histogram-of-oriented-gradients>.
8. Kratkij obzor algoritma mashinogo obucheniya Metod Opornyh Vektorov (SVM) // Jelektronnyj resurs: <https://habr.com/ru/post/428503>.
9. Raspberry Pi Face Recognition // Jelektronnyj resurs: <https://pyimagesearch.com/2018/06/25/raspberry-pi-face-recognition>.

Поступила 2 декабря 2021 г.

МРНТИ 27.17.27

УДК 512.624.2

НЕКОТОРЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ БИНОМИАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В ПОЛЯХ ГАЛУА

Матрасулова Д.К.

Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева

Алматы, Республика Казахстан

e-mail: dinara.kutlimuratovna@gmail.com

Предложен вывод выражений для биномиальных коэффициентов, вычисляемых в полях Галуа для частного случая, отвечающего предпоследней строке треугольника Паскаля, который для рассматриваемых полей де-факто является конечным. Точнее, для полей Галуа, содержащих p элементов, выражение для биномиальных коэффициентов, стоящих в r -той строке, является тривиальным и интерес представляют только строки по $(p-1)$ -ую включительно. Показано, что все биномиальные коэффициенты в предпоследней строке можно считать равными ± 1 . Представлен конкретный пример треугольника Паскаля, позволяющий сделать наглядным сопоставление вычислений в полях Галуа с результатами из теории чисел. Подчеркивается, что рассматриваемый частный случай представляет интерес для новых подходов к цифровой обработке сигналов, использующих их представление через функции, принимающие значения в полях Галуа. Подчеркивается, что предложенный подход создает основу для последующего обобщения цифрового аналога теоремы о свертке, справедливой при использовании функций, принимающих значения в полях Галуа, на случай описания нелинейных систем. Проводится сопоставление полученных результатов с выводом теоремы Вильсона, построенным на основе использования теории полей.

Ключевые слова: *поля Галуа, биномиальные коэффициенты, теорема Вильсона, простое число, многозначная логика, цифровая обработка сигналов, треугольник Паскаля.*

Қарастырылып отырған өрістер үшін іс жүзінде соңғы болып табылатын Паскаль үшбұрышының соңғыдан кейінгі жолына сәйкес келетін ерекше жағдай үшін Галуа өрістерінде есептелген биномдық коэффициенттер үшін өрнектердің туындысы ұсынылған. Дәлірек айтқанда, құрамында p элементтері бар Галуа өрістері үшін --ші қатардағы биномдық коэффициенттердің өрнегі тривиальды және $(p-1)$ -ші қосатын жолдар ғана қызығушылық тудырады. Соңғыдан кейінгі қатардағы барлық биномдық коэффициенттерді ± 1 -ге тең деп санауға болатыны көрсетілген. Паскаль үшбұрышының нақты мысалы келтірілген, ол Галуа өрістеріндегі есептеулерді сандар теориясының нәтижелерімен салыстыруды визуализациялауға мүмкіндік береді. Қарастырылып отырған нақты жағдай Галуа өрістерінде мәндерді қабылдайтын функциялар тұрғысынан олардың ұсынылуын пайдаланатын цифрлық сигналдарды өңдеудің жаңа тәсілдері үшін қызығушылық тудыратыны атап өтіледі. Ұсынылған тәсіл сызықты емес жүйелерді сипаттау жағдайында Галуа өрістерінде мәндерді қабылдайтын функцияларды пайдалану кезінде жарамды конвульсия теоремасының цифрлық аналогын кейіннен қорытуға негіз болатыны атап өтіледі. Алынған нәтижелер өріс теориясын қолдану негізінде Вильсон теоремасын шығарумен салыстырылады.

Түйінді сөздер: *Галуа өрістері, биномдық коэффициенттер, Вильсон теоремасы, жай сан, көп мәнді логика, цифрлық сигналды өңдеу, Паскаль үшбұрышы.*

A derivation of expressions for binomial coefficients calculated in Galois fields for a special case corresponding to the penultimate row of Pascal's triangle, which is de facto finite for the considered fields, is proposed. More precisely, for Galois fields containing p elements, the expression for the binomial coefficients in the $-th$ row is trivial, and only rows up to $(p-1)-th$ inclusive are of interest. It is shown that all binomial coefficients in the penultimate row can be considered equal to ± 1 . A specific example of Pascal's triangle is presented, which makes it possible to visualize the comparison of calculations in Galois fields with results from number theory. It is emphasized that the particular case under consideration is of interest for new approaches to digital signal processing that use their representation in terms of functions that take values in Galois fields. It is emphasized that the proposed approach creates the basis for the subsequent generalization of the digital analogue of the convolution theorem, which is valid when using functions that take values in Galois fields, to the case of describing nonlinear systems. The obtained results are compared with the derivation of Wilson's theorem based on the use of field theory.

Keywords: Galois fields, binomial coefficients, Wilson's theorem, prime number, multivalued logic, digital signal processing, Pascal's triangle.

В работах [1–3] было показано, что использование полей Галуа $GF(p^n)$, в том числе и при $n = 1$ является весьма перспективным для цифровой обработки сигналов. В частности, существует возможность построить аппарат спектрального анализа сигналов за счет использования базиса, составленного из функций, принимающих значения в полях Галуа.

Подход, предложенный в работах [1–3], представляет интерес не только с точки зрения цифровой обработки сигналов. Существует более чем тесная корреляция между полями Галуа и многозначной логикой, которая наглядно была продемонстрирована, например, в работе [4]. В свою очередь, данная связь может быть использована для преодоления тезиса о логической непрозрачности нейронных сетей, как это было показано в работах [5, 6].

В данной работе установлены некоторые соотношения для биномиальных коэффициентов, возникающих при расчетах в полях Галуа. Эти соотношения предназначены, в частности, для последующего использования при переходе от результатов работы [3], где был доказан цифровой аналог теоремы о свертке, к более сложным операциям аналогичного типа. Точнее, операция свертки, рассмотренная в цитированной работе, является линейной. Полученные в данной работе соотношения предназначены для последующего описания нелинейных систем, которые, как и операция свертки, удовлетворяют условию инвариантности относительно сдвига по времени. Полученные результаты представляют также интерес и с точки зрения обеспечения наглядности использования полей Галуа для цифровой обработки сигналов. Это является важным, так как в программу обучения специалистов в области информационных технологий, как правило не входит рассмотрение соответствующих вопросов.

В теории чисел известна теорема Вильсона [7], которая утверждает, что если p – простое число, то выражение $(p - 1)! + 1$ делится на p .

Иначе, теорема Вильсона выражается равенством

$$(p - 1)! \equiv -1(p) \tag{1}$$

где использование символа \equiv и числа p в круглых скобках означает, что равенство записано по модулю p .

Один из вариантов доказательства этой теоремы дается в теории алгебраических полей, точнее в данной теории теорема Вильсона является предельным случаем более общей

теоремы, гласящей, что произведение всех отличных от нуля элементов a_1, a_2, \dots, a_k поля Галуа $GF(p^n)$, где n – целое число, равно -1 .

Эта теорема, в свою очередь, непосредственно вытекает из соотношения

$$x^k - 1 = \prod_1^k (x - a_i), \quad (2)$$

которое выражает следующий факт.

Любой ненулевой элемент поля Галуа $GF(p^n)$ является корнем уравнения

$$x^k - 1 = 0 \quad (3)$$

В то же время, можно составить и произведение, стоящее в правой части формулы (2), т.е. полином степени k , который заведомо имеет те же самые корни, что и означает, что многочлен, стоящий в левой части соотношения (3), должен разлагаться на множители в соответствии с формулой (2).

Подставляя в формулу (2) $x = 0$, и принимая во внимание, что число k четно, получаем

$$-1 = \prod_1^k a_i \quad (4)$$

Для частного случая поля Галуа $GF(p)$ ненулевые элементы поля представляют собой целые числа $1, 2, \dots, p - 1$. (Точнее, это – представители классов вычетов по модулю p .) Следовательно, для этого случая произведение всех ненулевых элементов поля будет совпадать с выражением для факториала $(p - 1)!$, что после перехода к числам по модулю p и дает теорему Вильсона.

В данной работе показано, что, отталкиваясь от рассмотрения алгебраических выражений в терминах полей Галуа, можно получить некоторые соотношения, аналогичные теореме Вильсона, для биномиальных коэффициентов.

В частности, сходный результат получен для частного случая коэффициентов бинома

$$F(x, y) = (y - x)^{p-1}, \quad (5)$$

где p – простое число, который представляет интерес с точки зрения дальнейшей разработки новых методов цифровой обработки сигналов [1–3], а также с точки зрения преодоления тезиса о логической непрозрачности нейронных сетей [5, 6].

В теории полей доказывается [8], что

$$(y \pm x)^q = y^q \pm x^q \quad (6)$$

где q – характеристика поля.

Для полей $GF(p)$ число p совпадает с характеристикой.

Воспользуемся соотношением (6), чтобы определить биномиальные коэффициенты для случая (5). Рассмотрим выражения

$$y(y^{p-1} + y^{p-2}x + \dots + yx^{p-2} + x^{p-1}) = y^p + y^{p-1}x + \dots + y^2x^{p-2} + yx^{p-1} \quad (7)$$

$$x(y^{p-1} + y^{p-2}x + \dots + yx^{p-2} + x^{p-1}) = y^{p-1}x + y^{p-2}x^2 + \dots + yx^{p-1} + x^p \quad (8)$$

Вычитая из выражения (7) выражение (8), получаем

$$y^p - x^p = (y - x)(y^{p-1} + y^{p-2}x + \dots + yx^{p-2} + x^{p-1}) \quad (9)$$

Подставляя в правую часть формулы (9) соотношение (6), получаем

$$(y - x)^{p-1} = y^{p-1} + y^{p-2}x + \dots + yx^{p-2} + x^{p-1} \quad (10)$$

Для того, чтобы перейти от выражения (10) к выражению, позволяющему получить биномиальные коэффициенты, достаточно сделать замену $z = -x$. Тогда

$$(y + z)^{p-1} = y^{p-1} + (-1)^1 y^{p-2}x + \dots + (-1)^{p-2} yx^{p-2} + x^{p-1}, \quad (11)$$

если характеристика поля отлична от 2, т.е. число $p - 1$ четно.

Сравним выражение (11) с выражением через биномиальные коэффициенты.

$$(y + z)^{p-1} = y^{p-1} + C_{p-1}^1 y^{p-2}x + \dots + C_{p-1}^{p-2} yx^{p-2} + x^{p-1}, \quad (12)$$

Можно видеть, что для рассматриваемых биномиальных коэффициентов справедливо выражение

$$C_{p-1}^n = (-1)^n, \quad (13)$$

где p – простое нечетное число, $1 \leq n \leq p - 2$.

С точки зрения теории чисел, формула (13) переходит к результату, который можно получить и другими способами, например, на основе теоремы Люка. А именно,

$$C_{p-1}^n \equiv (-1)^n \pmod{p}, \quad (14)$$

Этот результат допускает простую проверку, которую целесообразно провести из соображений наглядности. А именно, формулу, по аналогии с одной из формулировок теоремы Вильсона можно трактовать следующим образом. Число $C_{p-1}^n - (-1)^n$ делится на p без остатка.

Проиллюстрируем сказанное примером для случая $p = 11$. Биномиальные коэффициенты для этого случая представлены в Таблице 1. Там же показаны числа, m и r , образующиеся при делении биномиального коэффициента C_{p-1}^n на $p = 11$ с остатком.

Можно видеть, что остаток равен или 1 или 10. Можно также сказать, что остаток есть ± 1 , если принять во внимание, что $10 \equiv -1 \pmod{11}$.

Для наглядности на рисеurt 1 представлен также треугольник Паскаля, построенный для случая $p = 13$ при непосредственных вычислениях по модулю 13. Видно, что в его 12-той строке стоят числа 12 и 1, что полностью отвечает результату, выражаемому формулой (14).

4. Suleimenov I.E, Bakirov A., Moldakhan I. Formalization of Ternary Logic for Application to Digital Signal Processing // In Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. – 2019. – P. 26–35.
5. Suleimenov I.E, Bakirov A., Moldakhan I. A technique for analyzing neural networks in terms of ternary logic // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2021. – N99(11). – P. 2537–2553.
6. Vitulyova Y.S., Bakirov A.S., Shaltykova D.B., Suleimenov I.E. Prerequisites for the analysis of the neural networks functioning in terms of projective geometry // IOP Publishing, in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 946, N. 1. – P. 012001.
7. Connes A. Around Wilson's theorem // Journal of Number Theory. – 2019. – N194. – P. 1–7.
8. B.L. van der Waerden Modern Algebra. – New York: Ungar, 1949. – 264 p.

Поступила 12 октября 2021 г.

МРНТИ 27.15

УДК 511

НАПРАВЛЕНИЯ РЕШЕНИЙ ВЕЛИКОЙ ТЕОРЕМЫ ФЕРМА

Мун А.С.

Казахский национальный университет, Алматы, Республика Казахстан

e-mail:mun.alex@mail.ru

Направления и пути доказательств великой теоремы Ферма вели от частных случаев к более общим. Общеизвестного простого доказательства до настоящего времени не существует. Сложное по содержанию и объему доказательство привел Э.Уайлс.

В данной работе исследованы основные свойства степенного ряда. На основании этих свойств приведено доказательство теоремы. Получены практические алгоритмы в теории криптографии, алгебраические уравнения в целых числах, числа Ферма. Показана невозможность решения полученных алгебраических уравнений в целых числах и разложения на простые множители. Заложены основы для дальнейшего изучения простых чисел и вычисления сверх больших чисел.

Ключевые слова: теорема Ферма, степенной ряд, криптография, алгебраические уравнения, разложение на простые множители, Э.Уайлс, теория чисел.

Ферманың ұлы теоремасын дәлелдеудің бағыттары мен жолдары жекелеген жағдайлардан жалпыға әкелді. Осы уақытқа дейін жалпыға біркелкі танылған қарапайым дәлел болған емес. Э. Уайлс мазмұны мен көлемі жағынан күрделі дәлелдер келтірді.

Бұл жұмыста дәрежелік қатардың негізгі қасиеттері зерттелген. Осы қасиеттердің негізінде теореманың дәлелі келтірілген. Криптография теориясында практикалық алгоритмдер, бүтін сандардағы алгебралық теңдеулер, Ферма сандары алынды. Бүтін сандардан алынған алгебралық теңдеулерді шешудің және қарапайым көбейткіштерге жіктеудің мүмкін еместігі көрсетілген. Жай сандарды әрі қарай зерттеу және өте үлкен сандарды есептеу үшін негіз қаланды.

Түйінді сөздер: Ферма теоремасы, дәрежелік қатар, криптография, алгебралық теңдеулер, қарапайым көбейткіштерге жіктеу, Э.Уайлс, сандар теориясы.

The directions and ways of proving Fermat's Last Theorem led from special cases to more general ones. A generally accepted simple proof does not yet exist. A. Wiles provided a complicated in content and volume proof of Fermat's Last Theorem.

In this paper, we study the main properties of the power series. The proof of the theorem is given on the basis of these properties. Practical algorithms in the theory of cryptography, algebraic equations in integers, Fermat numbers are obtained. The impossibility of solving the obtained algebraic equations in integers and decomposition into prime factors is shown. The foundations were laid for further study of prime numbers and calculation of super-large numbers.

Keywords: Fermat's theorem, power series, cryptography, algebraic equations, prime factorization, A. Wiles, number theory.

В математике существует множество путей решения той или иной проблемы, от простых до самых сложных. История доказательств великой теоремы Ферма насчитывает 350 лет, является прямым примером этого тезиса. Основы для формулировки теоремы заложены Пифагором, Диофантом, Евклидом и другими математиками древности [1].

П.Ферма, который сформулировал теорему в 1637 году, привел доказательства для случая $n = 4$, Л.Эйлер (1736г) $n = 3$, Дирихле и Лежандр для $n = 5$, Ламе – для $n = 7$ др. Следующие направления поиска решения предложили Б.Паскаль – вычисления (треугольник Паскаля) и И.Ньютон – бином Ньютона, алгебраические числа и др. Общая тенденция путей поиска решений была заложена мэтрами математики на столетия.

В 1995 году Эндрю Уайлс разорвал эту цепь и пошел по самому сложному пути. В результате титанических усилий он привел доказательство, которое общепризнано [2].

Э.Уайлс говорит: «Я думаю, что он обманул себя, думая, что у него есть доказательства. Но что сделало эту проблему особенной для любителей, так это небольшая вероятность того, что существует элегантное доказательство XVII века» [3].

Действительно, пока не существует простого доказательства теоремы Ферма. Есть лишь небольшая вероятность того, что П. Ферма нашел остроумное доказательство, которое не поместилось на полях «Арифметики» Диофанта.

Теорема Ферма будоражит умы математиков и «Ферматистов».

Безусловно, что такая ситуация не может продолжаться бесконечно и в этой истории должен быть элегантный и изящный конец.

Рассмотрим свойства степенного ряда

$$1^n, 2^n, 3^n, 4^n, 5^n, \dots, (X^n - 1)^n, (X^n)^n, (X^n + 1)^n, \dots,$$

$$1, 2, 3, 4, 5, \dots, (X^n - 1), X^n, (X^n + 1), \dots,$$

$$N! = (X^{n+n})^n - n*(X^{n+n-1})^n + n(n-1)/2 *(X^{n+n-2})^n - n(n-1)(n-2)/(2*3)*(X^{n+n-3})^n + \dots (-1)^n*(X^n)^n$$

$$N! = 1*2*3*4*5*6*7* \dots *n$$

$$(Z - m)^n = Z^n - \Phi(n, m, Z)$$

$$(Z1)^n = Z^n / 2, Z1 = Z / \sqrt[n]{2}, [Z1] = Z^n, [\dots] - \text{целая часть}$$

$$m = 1, 2, 3, \dots m1, m1 = Z - Z^n + 1.$$

Формулу $\Phi(n, m, Z)$ назовем усеченной формулой бинома Ньютона.

$N > 2$, X^n , Z – натуральные числа.

Числа X в интервале $X^n < X < (X^n + 1)$,

$(X^n)^n < X^n < (X^n + 1)^n$ являются не целыми числами.

Числа вида:

$$X_k^n = (X^\wedge)^n + k,$$

$$(X^\wedge)^n < X_k^n < (X^\wedge + 1)^n$$

$$X^\wedge < X_k < (X^\wedge + 1),$$

где $k = 1, 2, 3, \dots, K$, $K = (X^\wedge + 1)^n - (X^\wedge)^n - 1$.

Числа X_k являются не целыми числами, назовем их числами Ферма.

Числа вида:

$$X = X^\wedge + L, 0 < L < 1,$$

$$X^\wedge < X < (X^\wedge + 1)$$

$$X^n = (X^\wedge + L)^n$$

Для случая $X^n = X_k^n$ получим:

$$(X^\wedge + L)^n = (X^\wedge)^n + k,$$

$$L = \sqrt[n]{(X^\wedge)^n + k} - X^\wedge$$

При $k = 1$ получим:

$$X^n = (X^\wedge)^n + 1$$

Аналогично для X из интервала $(X^\wedge - 1) < X < X^\wedge$

$$X^n = (X^\wedge)^n - 1,$$

где X – не целое число.

Рассмотрим числа Ферма вида:

$$(X^+)^n = X^n + 1$$

$$(X^-)^n = X^n - 1$$

$$(X^+)^n - (X^-)^n = 2$$

Если X натуральные числа, то:

$$X^+ = \sqrt[n]{X^n + 1} = X^\wedge + L_1, 0 < L_1 < 1$$

$$X^- = \sqrt[n]{X^n - 1} = X^\wedge - L_2, 0 < L_2 < 1$$

$[X^-] = [X^\wedge - L2] = X^\wedge - 1$, [...] – целая часть числа, X^\wedge – целое число и

$$X^+ - [X^-] = X^\wedge + L1 - X^\wedge + 1 = 1 + L1 > 1$$

Если X не целое число, то:

$$X^+ = \sqrt[n]{Xn + 1} = X^\wedge + L1, \quad 0 < L1 < 1$$

$$X^- = \sqrt[n]{Xn - 1} = X^\wedge + L2, \quad 0 < L2 < 1$$

$$L1 > L2$$

$$X^- - [X^-] = X^\wedge + L2 - X^\wedge = L2 < 1$$

$$X^+ - X^- = L1 - L2 < 1$$

$$[X^-] = [X^\wedge + L2] = X^\wedge$$

$$[X^+] = [X^\wedge + L1] = X^\wedge$$

$$X^+ - [X^-] = X^\wedge + L1 - X^\wedge = L1 < 1$$

$$X^\wedge < X^+ < X^\wedge + 1 \tag{1}$$

$$X^\wedge < X^- < X^+ < X^\wedge + 1$$

Формулировка теоремы:

$$X^n + Y^n \neq Z^n$$

$n > 2$, где n – натуральное число и X, Y, Z любые не нулевые целые числа.

После прочтения условий теоремы возникают два вопроса:

1. Есть ли какие-то числа X, Y, Z , удовлетворяющие уравнению

$$X^n + Y^n = Z^n \tag{2}$$

Ответ: есть.

2. Есть ли среди них хоть одна комбинация, где X, Y, Z не нулевые целые числа?

Будем искать ответ на этот вопрос.

Предположим, что $X \geq Z$ или $Y \geq Z$, то

$$X^n + Y^n > Z^n.$$

И числа X и Y , удовлетворяющие уравнению (2), находятся в интервале

$$0 < X < Z \text{ и } 0 < Y < Z.$$

Уточним область изменения X и Y :

$$(Z1)^n = Z^n / 2, \quad Z1 = Z / \sqrt[n]{2}, \text{ тогда } 0 < X < Z1 < Y < Z.$$

В силу принципа симметрии (коммутативность)

$$X^n + Y^n = Y^n + X^n$$

Все комбинации решений относительно переменной Y будут аналогичны.

$$Z^n = X^n + Y^n < (X + Y)^n \text{ (Бином Ньютона), следует}$$

$$Z < (X + Y)$$

Перепишем формулировку теоремы:

$$X^n + Y^n = Z^n \tag{3}$$

$$0 < X < Z < Y < Z$$

$$Z < (X + Y)$$

$n > 2$, n – натуральные числа, для любых целых чисел Y, Z нет целых решений X .

Перепишем (3) в виде:

$$X^n = Z^n - Y^n$$

Введем переменные:

$$(X^+)^n = Z^{n+1} - Y^n = Z^n - Y^n + 1 = X^n + 1$$

$$(X^-)^n = Z^n - 1 - Y^n = Z^n - Y^n - 1 = X^n - 1$$

Очевидно, что

$$(X^-)^n < X^n < (X^+)^n \text{ и}$$

$$X^- < X < X^+ \tag{4}$$

Перепишем:

$$X^n = (X^+)^n - 1$$

$$X^n = (X^-)^n + 1.$$

В случае, если X^- или X^+ целые числа, то X не целое число (свойство степенного ряда).

Пусть X^- и X^+ – не целые числа и $X^\wedge = [X^-]$, (X^\wedge - целая часть числа X^-)

$$X^- = X^\wedge + L2, 0 < L2 < 1$$

Получим:

$$X^\wedge < X^- < X^\wedge + 1 \tag{5}.$$

Согласно свойству степенного ряда (1):

$$X^{\wedge} < X^{+} < X^{\wedge} + 1$$

Подставим (4) и (5) в это неравенство, получим:

$$X^{\wedge} < X^{-} < X < X^{+} < X^{\wedge} + 1$$

Таким образом, решение X не целое число.

Введем переменные:

$$Z_1^n = (X^{\wedge})^n + Y^n, (X^{\wedge})^n = Z_1^n - Y^n \quad (6)$$

$$Z_2^n = (X^{\wedge} + 1)^n + Y^n, (X^{\wedge} + 1)^n = Z_2^n - Y^n \quad (7)$$

Согласно неравенству (5) получим:

$$(X^{\wedge})^n < (X^{-})^n < (X^{\wedge} + 1)^n$$

$$(X^{-})^n = Z^n - 1 - Y^n$$

$$(X^{+})^n = Z^{n+1} - Y^n.$$

Получим:

$$Z_1^n - Y^n < Z^n - 1 - Y^n < Z_2^n - Y^n$$

$$Z_1^n < Z^n - 1 < Z_2^n \quad (8)$$

Подставим (6), (7) в неравенство $X^{\wedge} < X^{+} < X^{\wedge} + 1$ получим:

$$(X^{\wedge})^n < (X^{+})^n < (X^{\wedge} + 1)^n$$

$$Z_1^n - Y^n < Z^n + 1 - Y^n < Z_2^n - Y^n$$

$$\text{или } Z_1^n < Z^n + 1 < Z_2^n \quad (9)$$

Согласно неравенству (8) и (9) имеем:

$$Z_1^n < Z^n - 1 < Z^n < Z^n + 1 < Z_2^n. \quad (10)$$

Обозначим:

$$(Z^{-})^n = Z^n - 1$$

$$(Z^{+})^n = Z^n + 1,$$

где Z_1, Z_2 – не целые числа.

$$Z_1 < Z^{-} < Z < Z^{+} < Z_2$$

Рассмотрим уравнение:

$$X^n + Y^n = Z^n$$

$$0 < X < Z < Y < Z$$

$$Z < (X + Y),$$

где $n > 2$, X, Y – натуральные числа, $Z_1 = Z / \sqrt[n]{Z}$, Z – не целое число.

Заменим переменную в уравнении (3) Y на:

$$Y = Z - m$$

Получим:

$$X^n + (Z - m)^n = Z^n$$

Перепишем

$$X^n = Z^n - (Z - m)^n = \Phi(m, n, Z)$$

$$Z_1 = Z / \sqrt[n]{Z}, [Z_1] = Z^{\wedge}, [...] - \text{целая часть, } m = 1, 2, \dots, m_1, m_1 = Z - Z^{\wedge} + 1$$

Усеченная формула бинома Ньютона – $\Phi(m, n, Z)$, X – не целое число.

Число X нельзя представить в виде:

$$X = P_1 * P_2 * P_3 \dots P_k,$$

где k – натуральное число, P_k – простые числа.

$$P_1 * P_2 * P_3 \dots P_k \neq \Phi(m, n, Z)$$

Пример для $n = 3$:

$$\Phi(m, 3, Z) = Z^3 - (Z - m)^3 = Z^3 - (Z^3 - 3mZ^2 + 3m^2Z - m^3) = 3mZ^2 - 3m^2Z + m^3 = m * (3 * Z * (Z - m) + m^2)$$

Рассмотрим формулу:

$$\Phi_3 = 3 * Z * (Z - m) + m^2$$

При делении числа Φ_3 на 3, $Z, (Z - m)$ остаток от деления будет m^2 .

$$\text{mod}_3(\Phi_3) = m^2 \tag{11}$$

$$\text{mod}_2(\Phi_3) = m^2 \tag{12}$$

$$\text{mod}_a(\Phi_3) = m^2 \tag{13}$$

$$a = Z - m.$$

Пример:

Шифр – ФЗ, ключ – $(3, Z, (Z - m))$.

Алгоритмы с использованием формул (11), (12), (13) можно использовать в криптографии.

Заключение

В статье приведены новые числа – числа Ферма, усеченная формула Бинома Ньютона, свойства степенного ряда, новые алгоритмы в криптографии. Заложены дальнейшие пути поиска и классификации простых чисел и связь чисел Ферма с иррациональными числами, простым способом их вычисления до любого конечного знака. Данная методика исследования простого степенного уравнения может быть применена для рассмотрения «Гипотезы Билла». В следующей статье указанные вопросы будут освещены.

Литература:

1. Серовайский С.Я. Размышления о математике и ее истории. – Алматы: Оперативная полиграфия, 2015. – 856 с.
2. Wiles A.J. Modular elliptic curves and Fermat's Last Theorem // Annals of Mathematics. – 1995. – Vol. 141. – N 3. – P. 443–551.
3. Информационное агенство «Научная Россия». 22 октября 2021г. Интернет-портал «Научная Россия» /www.scientificrussia.ru/

References:

1. Serovajskij S.Ja. Razmyshlenija o matematike i ee istorii. – Almaty: Operativnaja poligrafija, 2015. – 856 s.
2. Wiles A.J. Modular elliptic curves and Fermat's Last Theorem // Annals of Mathematics. – 1995. – Vol. 141. – N 3. – P. 443–551.
3. Informacionnoe agenstvo «Nauchnaja Rossija». 22 oktjabrja 2021g. Internet-portal «Nauchnaja Rossija» /www.scientificrussia.ru/

Поступила 15 ноября 2021 г.

МРНТИ 47.05.17

УДК 621.3.019

СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ С ГИБРИДНЫМ ОСНОВАНИЕМ: НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОЗНАЧНОЙ ЛОГИКИ

Сулейменов И.Э.¹, Витулёва Е.С.²

¹Крымский Федеральный университет им. В.И. Вернадского,
Симферополь, Российская Федерация,

²Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева,
Алматы, Республика Казахстан
e-mail: lizavita@list.ru

Предложены системы счисления с гибридным основанием, в которых каждый разряд числа, записанного в системе по основанию, равному произведению простых чисел, подразделяется на подразряды. Эти подразряды отвечают определенным полям Галуа, отвечающих простым числам, формирующим основание базовой системы счисления. Разбиение разряда на подразряды осуществляется на основе теории алгебраических идеалов, что позволяет представить число в виде линейно комбинации идемпотентных элементов с коэффициентами, отвечающими элементам полей Галуа. Рассмотрен конкретный пример двоично-троичной логики, к которой приводятся операции, осуществляемые в системе счисления с основанием шесть. Показано, что операции в десятичной системе счисления аналогичным образом могут быть приведены к операциям двоично-пятиричной логики. Обсуждаются вопросы практического использования алгоритмов, построенных на основе гибридных систем счисления, в частности, предложена схема сумматора, оперирующего двоично-троичной логикой. Обосновываются преимущества предлагаемого подхода с точки зрения производительности вычислений и возможности его использования в вычислительной технике на инновационной элементной базе.

Ключевые слова: системы счисления, алгебраические кольца, поля Галуа, классы вычетов, вычислительные алгоритмы, троичная логика, алгебраические идеалы.

Гибридтік негізі бар санау жүйелері ұсынылған, онда жүйеде жай сандардың көбейтіндісіне тең негізде жазылған санның әрбір разряд бөлімшелерге бөлінеді. Бұл ішкі цифрлар негізгі санау жүйесінің негізін құрайтын жай сандарға сәйкес келетін белгілі Галуа өрістеріне сәйкес келеді. Разрядты ішкі цифрларға бөлу алгебралық идеалдар теориясының негізінде жүзеге асырылады, бұл санды Галуа өрістерінің элементтеріне сәйкес келетін коэффициенттері бар идемпотентті элементтердің сызықтық комбинациясы ретінде көрсетуге мүмкіндік береді. Екілік-үштік логиканың нақты мысалы қарастырылған, оған алты негіздік санау жүйесінде орындалатын амалдар келтірілген. Ондақ санау жүйесіндегі амалдарды екілік-бестік логиканың амалдарына ұқсас етіп келтіруге болатыны көрсетілген. Гибридті санау жүйелеріне негізделген алгоритмдерді практикалық қолдану мәселелері талқыланады, атап айтқанда, екілік-үштік логикамен жұмыс істейтін сумматорлық схема ұсынылады. Ұсынылған тәсілдің есептеу өнімділігі тұрғысынан артықшылығы және оны инновациялық элементтік негізде есептеулерде пайдалану мүмкіндігі негізделеді.

Түйінді сөздер: санау жүйелері, алгебралық сақиналар, Галуа өрістері, қалдық кластары, есептеу алгоритмдері, үштік логика, алгебралық идеалдар.

Hybrid-base numbering systems are proposed in which each digit of a number recorded in the system on a base equal to the product of prime numbers is subdivided into subclasses. These subdivisions correspond to specific Galois fields that correspond to the prime numbers that form the base of the base number system. Division of a digit into subunits is based on the theory of algebraic ideals, which allows the number to be represented as a linear combination of idempotent elements with coefficients corresponding to the elements of the Galois fields. A specific example of binary ternary logic to which operations performed in a number system with a base of six are given is considered. It is shown that operations in the decimal number system can similarly be reduced to operations in binary-ternary logic. The issues of practical use of algorithms based on hybrid number systems are discussed. In particular, a scheme of an adder operating with binary and ternary logic is proposed. The advantages of the proposed approach in terms of computing performance and the possibility of its use in computing machinery on innovative element base are substantiated.

Keywords: *number systems, algebraic rings, Galois fields, deduction classes, computational algorithms, ternary logic, algebraic ideals.*

Введение

В настоящее время активно разрабатываются вычислительные системы на инновационной элементной базе. Существующие подходы отличаются большой вариативностью: в литературе рассматриваются квантовые вычислительные системы [1,2], вычислительные системы на основе нанотехнологий [3,4] и т.д. Упомянутая заслуживает также возможность создания вычислительных систем на квазибиологической основе [5]. Вопрос об этом, как было показано в [6], тесно примыкает к проблеме отыскания механизмов эволюции, предшествовавшей биологической. А именно, в цитированной работе, а также в [7], было показано, что существуют механизмы эволюции сложных систем, для которых определяющими являются их нейросетевые свойства. Генерация фиксируемой информации (в том числе и генетической) может происходить в соответствии с механизмами, алгоритм которых во многом аналогичен алгоритмам помехоустойчивого кодирования (как было показано в [8, 9] существует глубокая аналогия между характером функционирования искусственных нейронных сетей и алгоритмами помехоустойчивого кодирования). Генезис фиксируемой информации в данном случае связан с тем, что эволюционирующая нейронная сеть (или ее аналог, порожденный, например, особенностями конкретной физико-химической системы) выделяет – в соответствии с указанными выше алгоритмами – вполне определенный код, который может быть зафиксирован в силу существования обратной связи между архитектурой эволюционирующей нейронной сети и ее реакций на внешние воздействия [10]. Данная трактовка полностью соответствует также и концепциям диалектического позитивизма [11], в рамках которого рассматривается иерархия информационных объектов.

Данные выводы являются дополнительным аргументом, заставляющим обратить самое пристальное внимание на многозначную логику как на основу нетривиальных вычислительных систем. Подчеркнем, что в литературе уже неоднократно отмечалось, что, например, троичная логика имеет вполне определенные преимущества по сравнению с двоичной [12–14]. Высказанные выше соображения, очевидно, усиливают данный тезис – нет оснований предполагать, что вычислительные или близкие к ним системы, возникающие естественным путем, будут использовать именно двоичную логику.

Подчеркнем также, что, вопреки широко распространенному тезису о логической непрозрачности нейронных сетей, механизмы их функционирования могут быть раскрыты (в том числе, благодаря существованию упомянутой выше аналогии с помехоустойчивым

кодированием), причем существенную роль здесь играет аппарат многозначной логики [15], который вновь вызывает в последнее время пристальный интерес исследователей [16, 17]. Уместно также отметить, что в настоящее время стоит вопрос о физической реализации искусственных нейронных сетей различного типа, в частности, оптических [18, 19]. Нет никаких оснований утверждать, что для них оптимальным будет использование двоичной логики (использование аналогов нейронов, выход которых характеризуется переменными двоичной логики).

Таким образом, существуют все предпосылки для того, чтобы создавать алгоритмы функционирования нетривиальных вычислительных систем, в частности, основанные на гибридных системах счисления, ранее предложенных в работе [20].

Целью данной работы является разработка алгоритмов функционирования вычислительных систем, использующих системы счисления с гибридным (вариативным) основанием.

Системы счисления с гибридным основанием и их преимущества

Традиционная запись числа в системе счисления с фиксированным основанием

$$a = \dots a_2 a_1 a_0 \quad (1)$$

представляет собой не более чем сокращенный вариант записи вполне определенной вычислительной процедуры.

Так, если запись (1) относится к десятичной системе счисления, то она представляет собой сокращенную форму следующей формулы

$$a = a_0 + 10^1 \cdot a_1 + 10^2 \cdot a_2 + \dots \quad (2)$$

в которой по традиции опущены степени числа 10 и знаки суммирования.

В работе [20] были предложены системы счисления с вариативным основанием, построенные на известной теореме из теории алгебраических идеалов. В соответствии с нею, полупростые кольца с условием минимальности R распадаются на прямую сумму идеалов r_i

$$R = r_1 + r_2 + \dots + r_n \quad (3)$$

При этом каждый из этих идеалов порождается идемпотентными элементами e_i

$$r_i = R e_i, \quad (4)$$

которые взаимно аннулируют друг друга

$$e_i e_j = 0, i \neq j; e_i e_i = e_i, \quad (5)$$

а их сумма равна единице кольца R

$$\sum_i e_i = 1 \quad (6)$$

Примером такого кольца является кольцо, получающееся через гомоморфное отображение кольца целых чисел на кольцо классов вычетов по модулю 6. В этом случае (когда операции совершаются по модулю) любое число, меньшее 6, представимо в виде

$$u = 3 \cdot u_1 + 4 \cdot u_2 \tag{7}$$

где $u_{1,2}$ принимают следующие значения.

$$u_1 = 0,1; u_2 = 0,1,2 \tag{8}$$

Т.е. одна из этих переменных отвечает двоичной логике, а вторая – троичной.

Можно видеть, что при операциях по модулю 6 числа элементы кольца классов вычетов, фигурирующие в (7) действительно выступают как идемпотентные элементы, т.е. имеет место

$$3 \cdot 3 = 9 = 3 + 6 \equiv 3(6), 4 \cdot 4 = 16 = 12 + 4 \equiv 4(6) \tag{9}$$

Более того, эти элементы аннулируют друг друга,

$$3 \cdot 4 = 12 \equiv 0(6), \tag{10}$$

а их сумма по модулю 6 равна единице

$$4 + 3 = 7 = 6 + 1 \equiv 1(6) \tag{11}$$

Тем самым можно видеть, что, во-первых, рассматриваемое кольцо классов вычетов действительно представляет собой пример выполнения соотношений (3) – (6), а кроме того, этот пример подчеркивает, что число элементов в идеалах, на которые распадается кольцо, не обязательно должно быть одинаковым.

Конкретно, число 6 является произведением простых чисел 3 и 2, поэтому идеалы, порожденные идемпотентными элементами, отвечают полям Галуа $GF(3)$ и $GF(2)$. Они содержат 3 и 2 элементов, соответственно, как это и показывают соотношения (8).

В соответствии с результатами [20], отталкиваясь от аналогии с записью десятичного числа в форме (1), от записи (7) можно перейти к записи

$$u = u_1 u_2 \tag{12}$$

в которой символы $u_{1,2}$ отвечают аналогам разрядов.

Фактически можно говорить о том, что данная запись представляет собой не более чем одну из разновидностей кодировок целых чисел, не превосходящих 5 (Таблица 1).

Таблица 1 – Кодировка чисел, не превосходящих 5, при помощи выражения (12)

$u_1 \backslash u_2$	0	1	2
0	0	4	2
1	3	1	5

Преимуществом систем счисления предложенного в [20] типа является то, что с аналогами разрядов можно оперировать независимым образом.

Действительно, рассмотрим произведение двух чисел, записанных в форме (7)

$$u = e_1u_1 + e_2u_2, \tag{13}$$

принимая во внимание, что $e_{1,2}$ – идемпотентные элементы, а множества значений переменных $u_{1,2}$ изоморфны некоторым полям Галуа, порождаемым простыми числами $p_{1,2}$, с несовпадающим количеством элементов.

Имеем

$$u^{(1)}u^{(2)} = (e_1u_1^{(1)} + e_2u_2^{(1)})(e_1u_1^{(2)} + e_2u_2^{(2)}) \tag{14}$$

В силу того, что $e_{1,2}$ являются взаимно аннулирующими идемпотентными элементами, имеем

$$u^{(1)}u^{(2)} = e_1u_1^{(1)}u_1^{(2)} + e_2u_2^{(1)}u_2^{(2)} \tag{15}$$

Аналогичный результат справедлив и для операции сложения.

$$u^{(1)} + u^{(2)} = e_1[u_1^{(1)} + u_1^{(2)}] + e_2[u_2^{(1)} + u_2^{(2)}] \tag{16}$$

где сложение в квадратных скобках осуществляется по модулю числа, задающего соответствующий аналог разряда.

Примеры вычислений с использованием формул (15) и (16) представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Таблица сложения чисел в кодировке с основаниями (2, 3)

		0	1	2	3	4	5
		00	11	02	10	01	12
0	00	00	11	02	10	01	12
1	11	11	02	10	01	12	00
2	02	02	10	01	12	00	11
3	10	10	01	12	00	11	02
4	01	01	12	00	11	02	10
5	12	12	00	11	02	10	01

Число разрядов в записи (12) может быть увеличено. Например, запись

$$u = u_1u_2u_3 \tag{16}$$

может быть использована для представления чисел в системе счисления с набором оснований 2, 3 и 5.

Таблица 3 – Таблица умножения чисел в кодировке с основаниями (2, 3)

		0	1	2	3	4	5
		00	11	02	10	01	12
0	00	00	00	00	00	00	00
1	11	00	11	02	10	01	12
2	02	00	02	01	00	02	01
3	10	00	10	00	10	00	10
4	01	00	01	02	00	01	02
5	12	00	12	01	10	02	11

В этом случае

$$u = 15 \cdot u_1 + 10 \cdot u_2 + 6 \cdot u_3 \quad (17)$$

где

$$u_1 = 0,1, u_2 = 0,1,2, u_3 = 0,1,2,3,4 \quad (18)$$

Произведение чисел, используемых в качестве оснований, равно 30, поэтому вычисления проводятся по модулю 30. В частности, именно это и определяет выбор чисел, фигурирующих в формуле (17).

$$10 \cdot 10 = 10 \cdot (1 + 9) \equiv 10(30)$$

$$15 \cdot 15 = 15 \cdot (1 + 14) \equiv 15(30) \quad (19)$$

$$6 \cdot 6 = 5 \cdot (1 + 5) \equiv 6(30)$$

При этом также имеет место

$$6 \cdot 15 = 10 \cdot 6 = 10 \cdot 15 \equiv 0(30) \quad (20)$$

Кроме того, выполняется соотношение

$$15 + 10 + 6 \equiv 1(30), \quad (21)$$

которое можно рассматривать как частный случай общего соотношения (6).

Рассмотрим конкретный пример проведения вычислений при помощи представления (17). Числа 7 и 23 представляются (кодируются) так, как показано в представленной ниже формуле.

$$7 \cdot 23 \leftrightarrow 112 \cdot 123 = 121 \leftrightarrow 11 \quad (22)$$

Произведение в формуле (22) подсчитывается для каждого из разрядов независимо, при этом для первого (по счету) разряда произведение вычисляется по модулю 2, для второго и третьего – по модулю 3 и 5 соответственно. Аналогично вычисляется и сумма.

$$7 + 23 \leftrightarrow 112 + 123 = 000 \leftrightarrow 0 \quad (23)$$

Видно, что результат, полученный в предложенном представлении (кодировке), как и следовало ожидать, совпадает с результатом, получаемым прямым вычислением.

Конкретную кодировку чисел, не превосходящих 29, можно получить непосредственно на основании соотношения (21). А именно, единица в соответствии с ним кодируется записью 111, следовательно

$$u_i(n + 1) = u_i(n) + 1, \quad (24)$$

причем суммирование в последнем равенстве осуществляется по модулю p_i , где – простое число, отвечающее конкретному разряду. Именно этим способом получена кодировка для чисел, представленных в первом столбце Таблицы 4 (второй, третий и четвертый столбцы).

Покажем, как именно гибридные системы счисления могут быть использованы в цифровых устройствах, использующих многозначную логику.

Алгоритм функционирования сумматора на основе системы счисления с гибридным основанием

Рассмотрим теперь обычную запись в системе счисления с основанием 6. Она представляет собой упорядоченную последовательность символов (цифр)

$$c = \dots c_2 c_1 c_0, \quad (25)$$

которая интерпретируется через соотношение

$$c = c_0 + 6^1 \cdot c_1 + 6^2 \cdot c_2 + \dots, \quad (26)$$

которое, в свою очередь, обеспечивает также и приведение выражения для конкретного числа в записи (26) к десятичной системе счисления.

С учетом полученного выше результата, от записи (26) можно перейти к гибридному представлению числа в форме

$$q = \dots a_2 b_2 a_1 b_1 a_0 b_0 \quad (27)$$

В формуле (27) принято во внимание, что каждое число, не превосходящее 5, т.е. число, отвечающее любому разряду в системе счисления с основанием 6, может быть закодировано при помощи таблицы 1. В этой записи, в соответствии со сказанным выше,

$$a_i = 0,1, b_i = 0,1,2 \quad (28)$$

что соответствует комбинированной двоично-троичной логике.

Иначе говоря, запись (27) формально отвечает представлению числа в системе счисления с основанием 6, тогда как все используемые в ней символы отвечают двоично-троичной логике.

Таблица 4 – Кодировка чисел, не превосходящих по модулю 30 и представление операции, отвечающей поразрядному суммированию в гибридной системе счисления (основание 6 с дополнением основания 5)

1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{(30)}$	u_1 (2)	u_2 (3)	u_3 (5)	c_0	$c_0(5)$	$-c_0(5)$	c_0^+
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	4	0
2	0	2	2	2	2	3	0
3	1	0	3	3	3	2	0
4	0	1	4	4	4	1	0
5	1	2	0	5	0	0	0
6	0	0	1	0	0	0	1
7	1	1	2	1	1	4	1
8	0	2	3	2	2	3	1
9	1	0	4	3	3	2	1
10	0	1	0	4	4	1	1
11	1	2	1	5	0	0	1
12	0	0	2	0	0	0	2
13	1	1	3	1	1	4	2
14	0	2	4	2	2	3	2
15	1	0	0	3	3	2	2
16	0	1	1	4	4	1	2
17	1	2	2	5	0	0	2
18	0	0	3	0	0	0	3
19	1	1	4	1	1	4	3
20	0	2	0	2	2	3	3
21	1	0	1	3	3	2	3
22	0	1	2	4	4	1	3
23	1	2	3	5	0	0	3
24	0	0	4	0	0	0	4
25	1	1	0	1	1	4	4
26	0	2	1	2	2	3	4
27	1	0	2	3	3	2	4
28	0	1	3	4	4	1	4
29	1	2	4	5	0	0	4

Рассмотрим, каким именно образом в данной системе счисления может быть организован алгоритм сложения двух чисел. Уместно напомнить, что именно операция сложения двух чисел, представленных в двоичной системе счисления, де-факто является основой всей современной вычислительной техники. Соответственно, алгоритм сложения двух чисел, представляемых в гибридной двоично-троичной логике, и соответствующая схема сумматора может рассматриваться как первый шаг на пути создания гибридных платформ, обеспечивающих существенно повышение производительности вычислений.

Алгоритм суммирования двух чисел, представляемых в форме (27), можно отобразить следующей схемой (рисунок 1), которая является обобщением схемы, используемой в настоящее время в двоичных сумматорах.

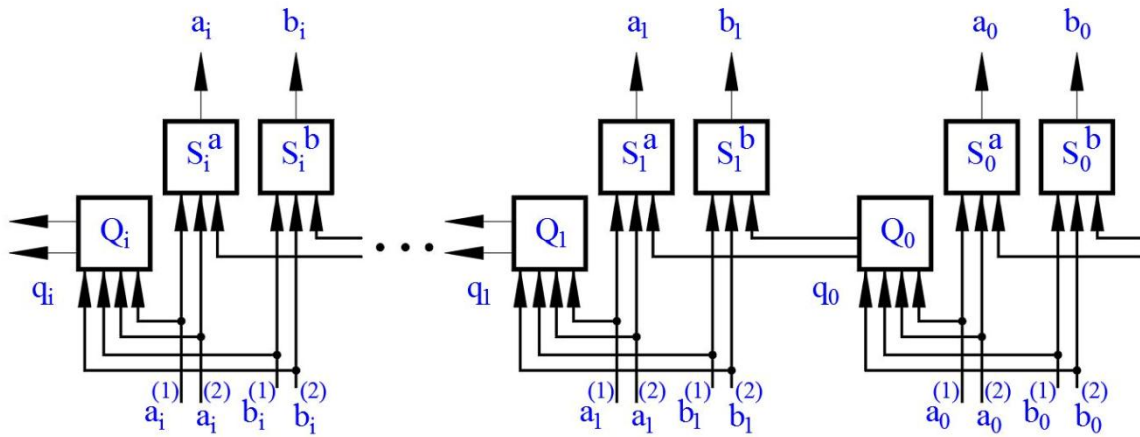


Рисунок 1 – Схема сумматора, отвечающего гибридной двоично-троичной логике

Данная схема предполагает сложение двух чисел, представленных в форме (27). Соответственно, каждому шестиричному разряду двух складываемых чисел отвечают пары $a_i^{(1)}, b_i^{(1)}$ и $a_i^{(2)}, b_i^{(2)}$. Результатом в пределах данного разряда является, соответственно пара a_i, b_i .

Элементы, входящие в данную схему, выполняют следующие функции. Элементы S_i^a выполняют суммирование чисел $a_i^{(1)}$ и $a_i^{(2)}$ по модулю 2. Элементы S_i^b выполняют суммирование чисел $b_i^{(1)}$ и $b_i^{(2)}$ по модулю 3. Если $i > 0$, то на входы элементов S_i^a и S_i^b поступает также сигнал, отвечающий дополнительному слагаемому, которое появляется, если $c_i^{(1)} + c_i^{(2)} \geq 6$. Подчеркиваем, что числа $c_i^{(1)}$ и $c_i^{(2)}$ отвечают значениями разрядов в исходном представлении (25).

Данный сигнал, соответствующий дополнительному третьему слагаемому, формируется элементом Q_i . Очевидно, что если суммируются два числа, то данный сигнал в представлении (19) может отвечать или нулю, или единице. Однако, в представлении (20) появляется нюанс. В соответствии с формулой (21), «единица» кодируется через запись «11», т.е. при использовании схемы рис.1 сигнал, формируемый элементом Q_i , если он отличен от нуля, подается одновременно на входы элементов S_i^a и S_i^b .

Обращаем внимание, что величины, отвечающие промежуточным разрядам, как это и вытекает из сказанного выше, суммируются независимым образом по модулям, отвечающим числам 2 и 3, т.е. в двоично-троичной логике.

Рассмотрим теперь операции, выполняемых элементами Q_i , которые и представляют наибольший интерес.

Отметим, что вычисления на основе двоичной логики получили столь широкое распространение, в том числе и потому, что аналогичная операция для такой логики сводится к операции в поле Галуа $GF(2)$. Действительно, ненулевой сигнал на выходе элемента Q_i по схеме рис. 2 возникает, когда как минимум на двух входах из трех (если считать вход переноса разряда) реализуется логическая единица. Такая операция характеризуется достаточно простой таблицей истинности, а для самого младшего из суммируемых разрядов элемент Q_0 она сводится к операции логического умножения логическое «И».

Переход к многозначным логикам ее существенно усложняет ситуацию. Покажем, что вместо логических операции можно использовать непосредственно алгебраические.

Поставим задачу для отыскания функций, которые должен реализовать сумматор, представленный на рисунке 1, в несколько более общей форме.

Рассмотрим сложение трех произвольных чисел, записанных в форме (7), т.е. отвечающих одному из разрядов числа (25), продолжая использовать гибридные системы счисления.

Очевидно, что максимальное значение такой сумма (в десятичной системе счисления) не превышает 15. Поэтому дополним запись (7) еще одним разрядом, используя наименьшее подходящее простое число, т.е. 5. На практике это означает, что к двум разрядам рассматриваемого числа нужно дописать третий в соответствии с правилом (24). Иначе, если исходная кодировка отвечала второй и третьей колонкам Таблицы 4, то теперь к ним нужно добавить символ (цифру), стоящую в четвертой колонке.

Наша задача состоит в том, чтобы определить значение числа, которое возникает при операции переноса разряда. Иначе, от записей вида a_0b_0 для каждого из трех суммируемых чисел, нужно перейти к записи вида $a_1b_1a_0b_0$ для их суммы.

Поступим следующим образом. Запишем в пятой колонке Таблицы 4 значение c_0 , которое представляет собой значение того числа, которое образуется при переходе от записи вида a_0b_0 к шестиричному представлению соответствующего числа. В шестой колонке данной таблице записано число $c_0(5)$, т.е. то число, которое образуется, если взять c_0 по модулю 5. В седьмой колонке записано число, дополнительное к $c_0(5)$ по модулю 5.

Складывая это число $-c_0(5)$ с числом, стоящим в четвертой колонке, получаем требуемое значение разряда переноса. На последнем шаге его достаточно преобразовать к виду a_1b_1 . Это и решает поставленную задачу, прямым подтверждением чему является Таблица 4. Подчеркнем, что запись $c_0^+c_0$ фактически и представляет собой запись чисел, стоящих в первой колонке Таблицы 4 в шестиричной системе счисления.

Тем самым описан алгоритм действия элемента сумматора Q_i в схеме рисунка 1, причем в достаточно общей форме, т.к. этот алгоритм относится к суммированию трех произвольных чисел в форме a_0b_0 , тогда как значения, которые может принимать разряд переноса в действительности являются ограниченными.

Таким образом, могут быть предложены гибридные системы счисления, использующие основные свойства алгебраических колец. Это существенным образом расширяет возможности использования многозначной логики в цифровой технике.

Таблица 5 – Кодировка чисел, не превосходящих по модулю 30 и представление операции, отвечающей поразрядному суммированию в гибридной системе счисления (основание 10)

$U_{(30)}$	$u_1 (2)$	$u_2 (3)$	$u_3 (5)$				
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	2	0
2	0	2	2	2	2	1	0
3	1	0	3	3	0	0	0
4	0	1	4	4	1	2	0
5	1	2	0	5	2	1	0
6	0	0	1	6	0	0	0
7	1	1	2	7	1	2	0
8	0	2	3	8	2	1	0
9	1	0	4	9	0	0	0
10	0	1	0	0	0	0	1
11	1	2	1	1	1	2	1
12	0	0	2	2	2	1	1
13	1	1	3	3	0	0	1
14	0	2	4	4	1	2	1
15	1	0	0	5	2	1	1
16	0	1	1	6	0	0	1
17	1	2	2	7	1	2	1
18	0	0	3	8	2	1	1
19	1	1	4	9	0	0	1
20	0	2	0	0	0	0	2
21	1	0	1	1	1	2	2
22	0	1	2	2	2	1	2
23	1	2	3	3	0	0	2
24	0	0	4	4	1	2	2
25	1	1	0	5	2	1	2
26	0	2	1	6	0	0	2
27	1	0	2	7	1	2	2
28	0	1	3	8	2	1	2
29	1	2	4	9	0	0	2

Литература:

1. Huang T. et al. Quantitative calculation for the contribution of acid rain to carbonate weathering // *Journal of Hydrology*. – 2019. – Vol. 568. – P. 360–371.
2. Wang D., Zhou H. Quantitative evaluation of the computational accuracy for the Monte Carlo calculation of radiative heat transfer // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2019. – Vol. 226. – P. 100–114.
3. Zidan M. A., Strachan J. P., Lu W. D. The future of electronics based on memristive systems // *Nature electronics*. – 2018. – Vol. 1. – N 1. – P. 22–29.
4. Boybat I. et al. Neuromorphic computing with multi-memristive synapses // *Nature communications*. – 2018. – Vol. 9. – N 1. – P. 1–12.
5. Tanaka G. et al. Recent advances in physical reservoir computing: A review // *Neural Networks*. – 2019. – N. 115. – P. 100–123.
6. Mun G. A., Moldakhan I., Serikbay A. M., Kaldybekov D., Suleimenov I. E., Park K. Hydrophilic interpolymer associates—the key to solving the problem of pre-biological evolution // *International Journal of Biology and Chemistry*. – 2020. – Vol.13(1). – P. 4–13.
7. Suleimenov I., Panchenko S. Non-Darwinists Scenarios of Evolution of Complicated Systems and Natural Neural Networks Based on Partly Dissociated Macromolecules // *World Applied Sciences Journal*. – 2013. – Vol. 24(9). – P. 1141–1147.
8. Vitulyova Y.S., Bakirov A.S., Shaltykova D.B., Suleimenov I.E. Prerequisites for the analysis of the neural networks functioning in terms of projective geometry // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 946(1). – P. 012001.
9. Bakirov A.S., Suleimenov I.E. On the possibility of implementing artificial intelligence systems based on error-correcting code algorithms // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2021. – Vol. 99(1) – P. 83–99.
10. Suleimenov I.E., Panchenko S.V., Sedlakova Z., Park, I.T. Advanced Applications of Evolution processes in in Solutions of Interacting Polymers // *Вестник НАН РК. Серия Физическая*. – 2015. – N55(4). – С. 122–127.
11. Suleimenov I.E., Gabrielyan O.A., Bakirov A.S., Vitulyova Y.S. Dialectical Understanding of Information in the Context of the Artificial Intelligence Problems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – 630(1). – P. 012007.
12. Merrill Jr R.D. Ternary logic in digital computers // *In Proceedings of the share design automation project*. – 1965. – January. – P. 6–10.
13. Keshavarzian P., Navi K. Universal ternary logic circuit design through carbon nanotube technology // *International Journal of Nanotechnology*. – 2009. – Vol. 6(10-11). – P. 942–953.
14. Jaber R. A. et al. High-performance and energy-efficient CNFET-based designs for ternary logic circuits // *IEEE Access*. – 2019. – T. 7. – P. 93871-93886.
15. Suleimenov I.E., Bakirov A.S., Matrassulova D.K. A technique for analyzing neural networks in terms of ternary logic // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2021. – 99(11). – P. 2537–2553.
16. Sun J. et al. Bi-objective elite differential evolution algorithm for multivalued logic networks // *IEEE Transactions on Cybernetics*. – 2018. – Vol. 50. – N 1. – P. 233–246.
17. Kobashi K. et al. Multi-valued logic circuits based on organic anti-ambipolar transistors // *Nano letters*. – 2018. – Vol. 18. – N 7. – P. 4355–4359.
18. Zuo Y. et al. All-optical neural network with nonlinear activation functions // *Optica*. – 2019. – Vol. 6. – N 9. – P. 1132–1137.
19. Kalimoldayev M.N., Suleimenov E.I., Pak I.T., Vitulyova E.S., Tasbulatova Z.S., Yevstifeyev, V.N., Mun, G.A. To the question of physical implementation of optical neural networks // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. – 2019. – Vol. 2(434). – P. 217–224.

20. Сулейменов И.Э. Бакиров А.С. Системы счисления с вариативным основанием и возможности их использования для цифровой обработки сигналов // Известия НТО «Кахак». – 2021. – № 2(73). – С. 65–74.

References:

1. Huang T. et al. Quantitative calculation for the contribution of acid rain to carbonate weathering // *Journal of Hydrology*. – 2019. – Vol. 568. – P. 360–371.
2. Wang D., Zhou H. Quantitative evaluation of the computational accuracy for the Monte Carlo calculation of radiative heat transfer // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2019. – Vol. 226. – P. 100–114.
3. Zidan M. A., Strachan J. P., Lu W. D. The future of electronics based on memristive systems // *Nature electronics*. – 2018. – Vol. 1. – N 1. – P. 22–29.
4. Boybat I. et al. Neuromorphic computing with multi-memristive synapses // *Nature communications*. – 2018. – Vol. 9. – N 1. – P. 1–12.
5. Tanaka G. et al. Recent advances in physical reservoir computing: A review // *Neural Networks*. – 2019. – N. 115. – P. 100–123.
6. Mun G. A., Moldakhan I., Serikbay A. M., Kaldybekov D., Suleimenov I. E., Park K. Hydrophilic interpolymer associates—the key to solving the problem of pre-biological evolution // *International Journal of Biology and Chemistry*. – 2020. – Vol.13(1). – P. 4–13.
7. Suleimenov I., Panchenko S. Non-Darwinists Scenarios of Evolution of Complicated Systems and Natural Neural Networks Based on Partly Dissociated Macromolecules // *World Applied Sciences Journal*. – 2013. – Vol. 24(9). – P. 1141–1147.
8. Vitulyova Y.S., Bakirov A.S., Shaltykova D.B., Suleimenov I.E. Prerequisites for the analysis of the neural networks functioning in terms of projective geometry // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 946(1). – P. 012001.
9. Bakirov A.S., Suleimenov I.E. On the possibility of implementing artificial intelligence systems based on error-correcting code algorithms // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2021. – Vol. 99(1) – P. 83–99.
10. Suleimenov I.E., Panchenko S.V., Sedlakova Z., Park, I.T. Advanced Applications of Evolution processes in in Solutions of Interacting Polymers // *Vestnik NAN RK. Serija Fizicheskaja*. – 2015. – N55(4). – С. 122–127.
11. Suleimenov I.E., Gabrielyan O.A., Bakirov A.S., Vitulyova Y.S. Dialectical Understanding of Information in the Context of the Artificial Intelligence Problems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – 630(1). – P. 012007.
12. Merrill Jr R.D. Ternary logic in digital computers // *In Proceedings of the share design automation project*. – 1965. – January. – P. 6–10.
13. Keshavarzian P., Navi K. Universal ternary logic circuit design through carbon nanotube technology // *International Journal of Nanotechnology*. – 2009. – Vol. 6(10-11). – P. 942–953.
14. Jaber R. A. et al. High-performance and energy-efficient CNFET-based designs for ternary logic circuits // *IEEE Access*. – 2019. – T. 7. – P. 93871-93886.
15. Suleimenov I.E., Bakirov A.S., Matrassulova D.K. A technique for analyzing neural networks in terms of ternary logic // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2021. – 99(11). – P. 2537–2553.
16. Sun J. et al. Bi-objective elite differential evolution algorithm for multivalued logic networks // *IEEE Transactions on Cybernetics*. – 2018. – Vol. 50. – N 1. – P. 233–246.
17. Kobashi K. et al. Multi-valued logic circuits based on organic anti-ambipolar transistors // *Nano letters*. – 2018. – Vol. 18. – N 7. – P. 4355–4359.
18. Zuo Y. et al. All-optical neural network with nonlinear activation functions // *Optica*. – 2019. – Vol. 6. – N 9. – P. 1132–1137.

19. Kalimoldayev M.N., Suleimenov E.I., Pak I.T., Vitulyova E.S., Tasbulatova Z.S., Yevstifeyev V.N., Mun G.A. To the question of physical implementation of optical neural networks // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2019. – Vol. 2(434). – P. 217–224.

20. Sulejmenov I. Je. Bakirov A.S. Sistemy schislenija s variativnym osnovaniem i vozmozhnosti ih ispol'zovanija dlja cifrovoj obrabotki signalov // Izvestija NTO «Kahak». – 2021. – № 2(73). – S. 65–74.

Поступила 11 ноября 2021 г.

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

МРНТИ 31.21.27 + 31.21.15

УДК 547.94

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ ОДНО- И ДВУМЕРНОЙ ЯМР-СПЕКТРОСКОПИИ ЦИТИЗИНА И ЕГО СИНТЕТИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДНЫХ

Сейлханов О.Т.¹, Зайытхан М.¹, Нуркенов О.А.², Сейлханов Т.М.¹

¹Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова, Кокшетау

²Институт органического синтеза и углекислотной химии Республики Казахстан, Караганда
Республика Казахстан

e-mail: tseilkhanov@mail.ru, nurkenov_oral@mail.ru

В работе идентифицированы методом ЯМР-спектроскопии растительный хинолизидиновый алкалоид цитизин, а также некоторые его синтетические производные, такие как цитафат (О,О-диметил-N-цитизинилфосфат), N-ацилцитизин и N-циннамоилцитизин. Использование возможностей ЯМР-спектроскопии высокого разрешения и применение методов одно- и двумерной спектроскопии, таких как DEPT ЯМР, COSY (¹H-¹H), TOCSY (¹H-¹H), НМРС (¹H-¹³C) ЯМР, позволило установить спин-спиновые взаимодействия гомо- и гетероядерной природы в рассматриваемых соединениях и однозначно и точно идентифицировать строение цитизина и его производных.

Рассмотрены изменения химических сдвигов и мультиплетности сигналов ¹H ЯМР и ¹³C ЯМР в цитизиновом фрагменте при введении в ее состав метокси-фосфонатной, ацетильной и циннамоильной групп. Полученные результаты рассмотрены с использованием понятий экранирования и дезэкранирования ядер атомов, влияния электронного индуктивного эффекта функциональной группы и пространственного расположения взаимовлияющих атомов и их устойчивости к электронным возмущениям. Определена сопоставительная сила дезэкранирующего влияния рассматриваемых функциональных групп на цитизиновый молекулярный остов. Обсуждены изменения мультиплетности спектров цитизина при введении функциональных групп.

Ключевые слова: алкалоид цитизин, цитафат, N-ацилцитизин, N-циннамоилцитизин, одно- и двумерная спектроскопия ЯМР, спин-спиновые взаимодействия.

Өсімдік хинолизидин алкалоидты цитизин, сондай-ақ оның кейбір синтетикалық туындылары, мысалы, цитафат (О,О-диметил-N-цитизинилфосфат), N-ацилцитизин және N-циннамоилцитизин ЯМР спектроскопиясы арқылы анықталды. Жоғары ажыратымдылықтағы ЯМР спектроскопиясының мүмкіндіктерін пайдалану және DEPT NMR, COZY (¹H-¹H), TOCSY (¹H-¹H), НМРС (¹H-¹³C) ЯМР сияқты бір- және екіөлшемді спектроскопия әдістерін қолдану қарастырылып отырған қосылыстарда гомо- және гетеронуклеарлы табиғаттың спиндік әсерлесуін орнатуға және цитизин мен оның туындыларының құрылымын бір мағыналы және дәл анықтауға мүмкіндік береді.

Цитизин фрагментіндегі метоксифосфонат, ацетил және циннамоил топтарын оның құрамына енгізу кезінде химиялық ығысулар мен ¹H ЯМР және ¹³C ЯМР сигналдарының мультиплеттілігінің өзгеруі қарастырылады. Алынған нәтижелер атом ядроларының экранирленуі және дезэкранирленуі, функционалдық топтың электрондық индуктивті әсерінің әсері және өзара әрекеттесетін атомдардың кеңістікте орналасуы және олардың электрондық бұзылыстарға

төзімділігі ұғымдарын қолдану арқылы қарастырылады. Қарастырылып отырған функционалдық топтардың цитизиннің молекуласына дезакранирлеу әсерінің салыстырмалы күші анықталды. Функционалдық топтарды енгізу кезінде цитизин спектрлерінің мультиплеттілігінің өзгеруі талқыланады.

Түйінді сөздер: цитизин алкалоиды, цитафат, *N*-ацилцитизин, *N*-циннамоилцитизин, бір- және екіөлшемді ЯМР-спектроскопиясы, спиндік әсерлесулер.

The plant quinolizidine alkaloid cytisine, as well as some of its synthetic derivatives, such as cytaphate (O,O-dimethyl-N-cytisinyl phosphate), N-acylcytisine, and N-cinnamoylcytisine, were identified by NMR spectroscopy. Exploiting the possibilities of high resolution NMR spectroscopy and applying 1D and 2D spectroscopy techniques such as DEPT NMR, COZY (^1H - ^1H), TOCSY (^1H - ^1H), HMQC (^1H - ^{13}C) NMR, made it possible to establish spin-spin interactions of a homo- and heteronuclear nature in the compounds under consideration and to unambiguously and accurately identify the structure of cytisine and its derivatives.

Changes in the chemical shifts and multiplicity of ^1H NMR and ^{13}C NMR signals in the cytisine fragment upon the introduction of methoxyphosphonate, acetyl, and cinnamoyl groups into its composition are considered. The results obtained are considered using the concepts of shielding and deshielding of atomic nuclei, the influence of the electronic inductive effect of the functional group, and the spatial arrangement of interacting atoms and their resistance to electronic disturbances. The comparative strength of the screening effect of the considered functional groups on the cytisine molecular backbone was determined. The changes in the multiplicity of the spectra of cytisine upon the introduction of functional groups are discussed.

Keywords: alkaloid cytisine, cytaphate, *N*-acylcytisine, *N*-cinnamoylcytisine, one- and two-dimensional NMR spectroscopy, spin-spin interactions.

Получение и идентификация природных и синтетических органических соединений требует от исследователей наличия современного парка физико-химической аппаратуры и умение работать с ними. Высокая достоверность полученных результатов и их воспроизводимость возможна при использовании высокоточного аналитического оборудования. Возросли требования к используемому в исследованиях приборам и редакциями высокорейтинговых научных журналах. Поэтому стандартным набором методов исследования химика-синтетика является наличие современного элементного анализатора, жидкостного и газового хроматографов, ИК-, УФ- и ЯМР-спектрометров.

В последнее время отечественные университеты, научно-исследовательские институты и производственные предприятия начали оснащаться современным оборудованием для аналитических целей от лучших мировых производителей. Одним из современных методов исследования строения органических соединений является спектроскопия ЯМР [1, 2]. Данный метод идентификации органических соединений успешно используется в мировой практике уже более полувека. Применение современных спектрометров ЯМР высокого разрешения позволяет еще более полно и детально идентифицировать исследуемые вещества [3–6]. В некоторых случаях возможно раздельное определение оптических изомеров исследуемых веществ в смеси и их количество.

Ранее в нашей стране незначительный ассортимент приборного парка ЯМР-спектрометров в нашей стране и их низкая разрешающая способность не позволяла однозначно и достоверно идентифицировать строение исследуемых веществ. Низкая разрешающая способность спектрометров давала значительные погрешности в измерениях и часто не могла дать однозначную трактовку сигнала. Не всегда можно было провести достоверную корреляцию спектров ^1H ЯМР со спектрами ^{13}C ЯМР. Нередко в научных изданиях публиковались результаты с вышеназванными несоответствиями.

В настоящее время использование возможностей ЯМР спектроскопии высокого разрешения и применение методов одно- и двумерной спектроскопии, таких как DEPT ЯМР, COSY (^1H - ^1H), TOCSY (^1H - ^1H), NOESY (^1H - ^1H), ROESY (^1H - ^1H), HMQC (^1H - ^{13}C), HMBC (^1H - ^{13}C) ЯМР, позволяющей установить спин-спиновые взаимодействия гомо- и гетероядерной природы, делают возможным однозначно и точно идентифицировать строение большого числа изучаемых соединений.

В данной работе нами предпринята попытка ЯМР-спектроскопической идентификации хинолизидинового алкалоида цитизина **1**, извлеченного из растительного казахстанского сырья, а также некоторых его синтетических производных, таких как цитафат (О,О-диметил-N-цитизинилфосфат) **2**, N-ацилцитизин **3** и N-циннамоилцитизин **4** (рисунок 1)

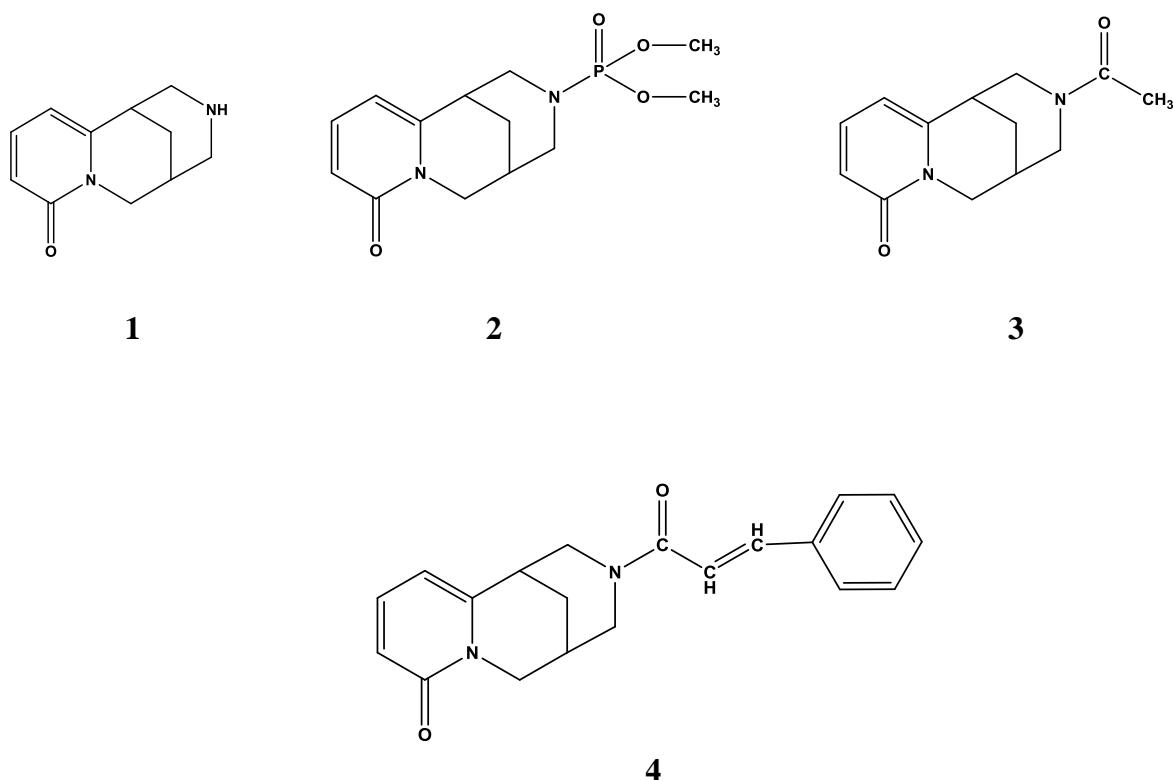


Рисунок 1 – Структурные формулы цитизина (**1**), цитафата (О,О-диметил-N-цитизинилфосфата) (**2**), N-ацилцитизина (**3**) и N-циннамоилцитизина (**4**)

Хинолизидиновый алкалоид цитизин природного происхождения, а также его производные были впервые синтезированы или получены новыми способами в лаборатории синтеза биологически активных веществ Института органического синтеза и углехимии РК в г. Караганде под руководством д.х.н., профессора Нуркенова О.А. и его сотрудниками и любезно предоставлены для ЯМР-спектроскопических исследований в лабораторию ЯМР-спектроскопии Кокшетауского университета им. Ш. Уалиханова. Их характеристики соответствовали данным, ранее опубликованным авторами [7-11].

В спектре ЯМР ^1H (рисунок 2) цитизина **1** двухпротонным синглетом при 1.77 м.д. проявились биспидиновые метиленовые протоны Н-8ах и Н-8еф. Соседние с метиленовыми протонами метинные протоны Н-9 и Н-7 резонировали однопротонными уширенным синглетом при 2.18 и двухпротонном мультиплетом при 2.83-2.84 м.д. соответственно.

Метиленовые протоны Н-10ах и Н-10еа регистрировались однопротонными дублетом дублета при 3.66 м.д. с 2J 15.5 и 3J 6.8 Гц и просто дублетом при 3.78 м.д. с 2J 15.5 Гц соответственно. Находящиеся по соседству с аминогруппой метиленовые протоны Н-11,11 и Н-13,13 регистрировались мультиплетом при 2.86-2.87 и 2.80-2.81 м.д. соответственно. Аминный протон Н-12 проявился уширенным синглетом при 2.88 м.д.

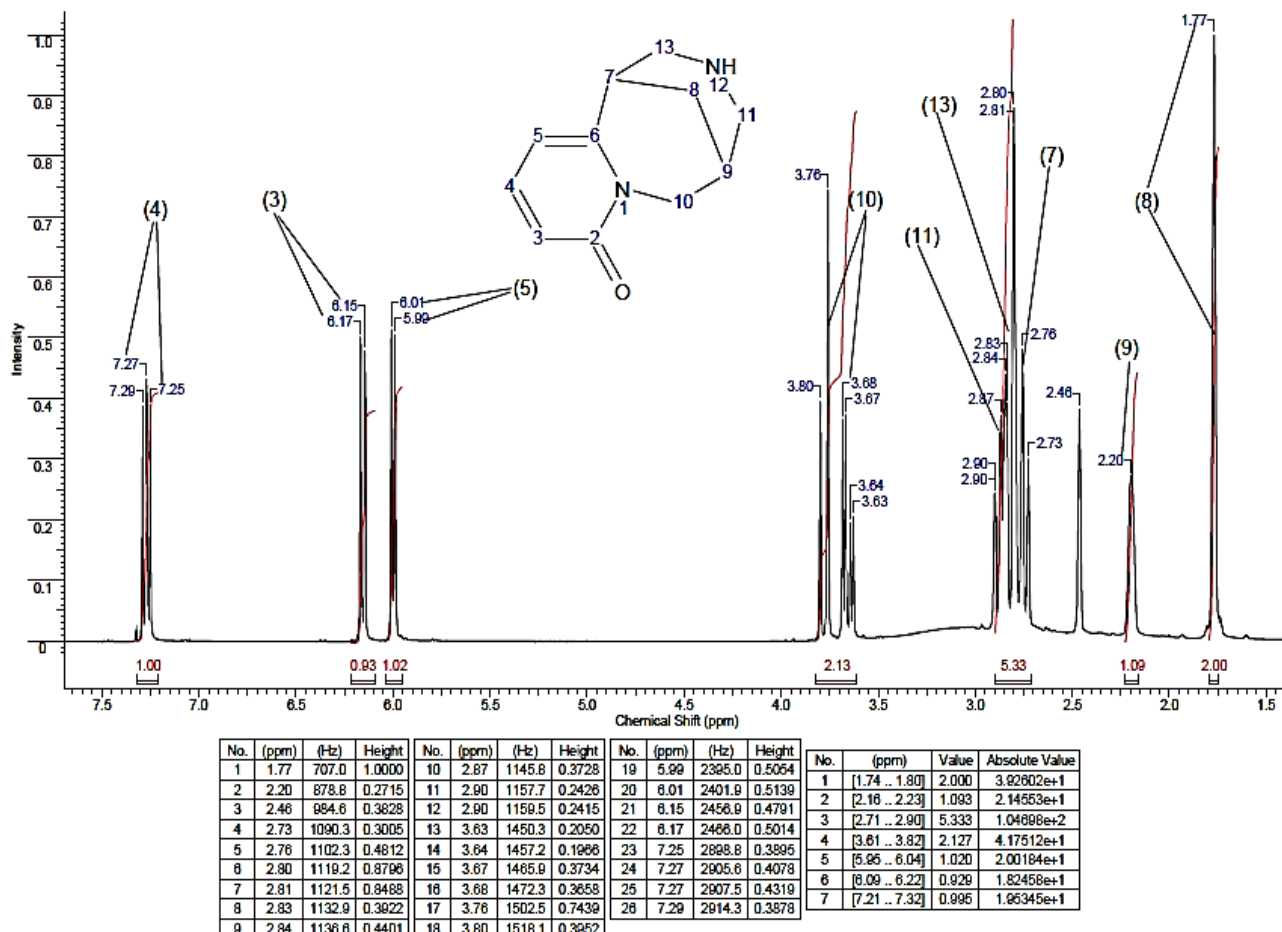


Рисунок 2 – Спектр ЯМР 1H цитизина

Метинные протоны α -хинольдинового ядра проявляются в слабopольной части протонного спектра в виде трех однопротонных дублета дублетов при 6.00 (Н-5, 3J 6.8 Гц, 4J 2.8 Гц), 6.15 (Н-3, 3J 8.0 Гц, 4J 0.8 Гц) и 7.27 (Н-4, 3J 8.8 Гц, 4J 6.8 Гц) м.д.

В спектре ЯМР ^{13}C цитизина **1** (рисунок 3) углеродные атомы биспидинового фрагмента резонировали при 26.41 (С-8), 27.75 (С-9), 35.33 (С-7), 49.98 (С-10), 53.16 (С-11) и 54.07 (С-13) м.д. В наиболее слабopольной области спектра при 104.36 (С-5), 115.60 (С-3), 139.19 (С-4), 152.95 (С-6) и 162.85 (С-2) м.д. регистрировались α -хинольдиновые углеродные атомы.

В спектре ЯМР ^{13}C анализ спектров DEPT указал на наличие в углеродном спектре четырех сигналов CH_2 - и пяти сигналов CH -групп (рисунок 4).

Строение соединения было подтверждено также методами двумерной спектроскопии ЯМР COSY (1H - 1H), TOCSY (1H - 1H) и HMQC (1H - ^{13}C) (рисунки 5–7), позволяющей установить спин-спиновые взаимодействия гомо- и гетероядерной природы. Наблюдаемые корреляции в молекуле представлены на рисунке 8.

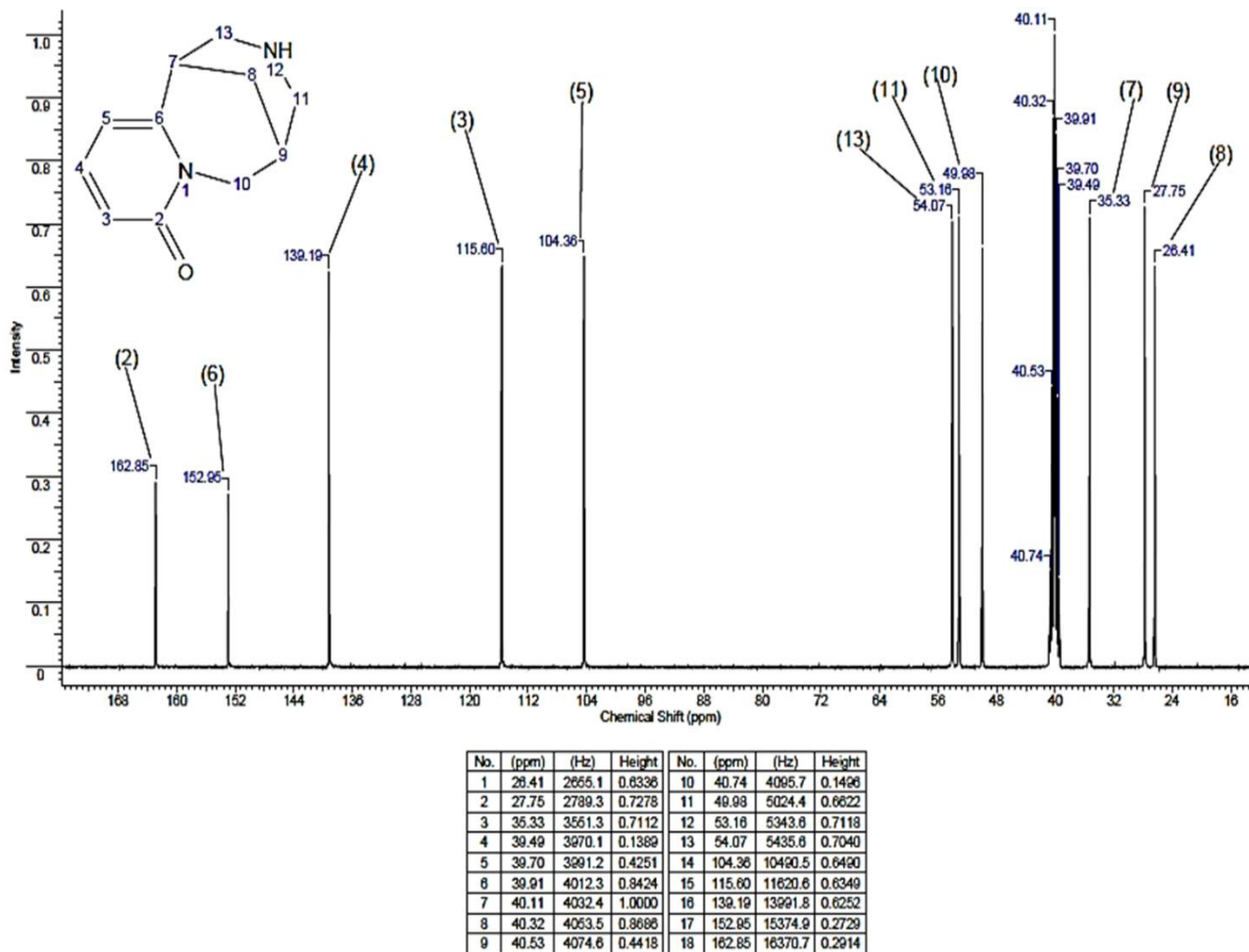


Рисунок 3 – Спектр ЯМР ¹³C цитизина

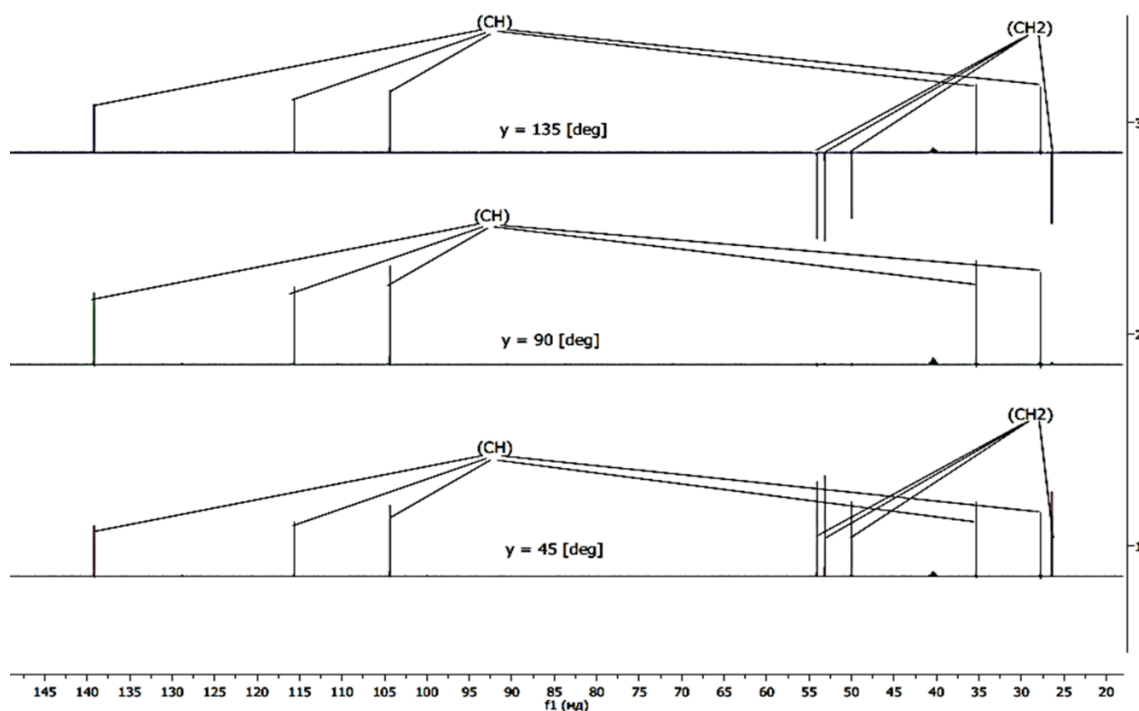


Рисунок 4 – Спектр ЯМР DEPT цитизина

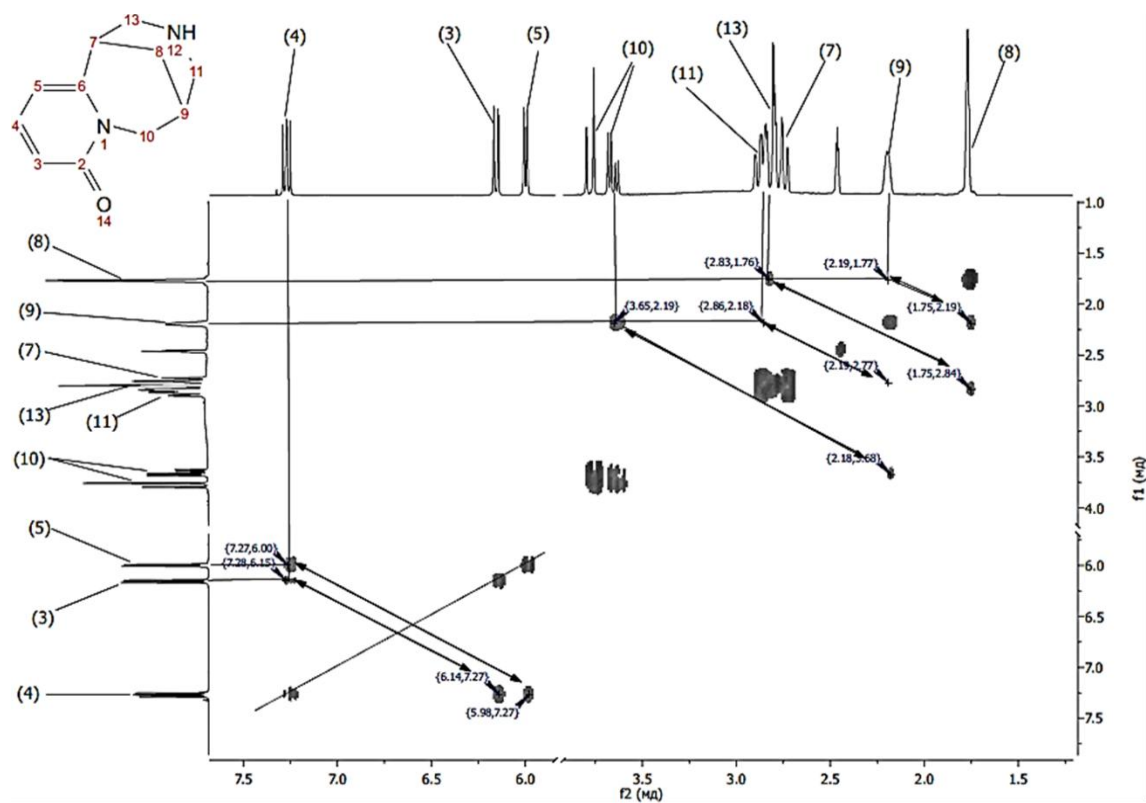


Рисунок 5 – Спектр ЯМР COSY (^1H - ^1H) цитизина

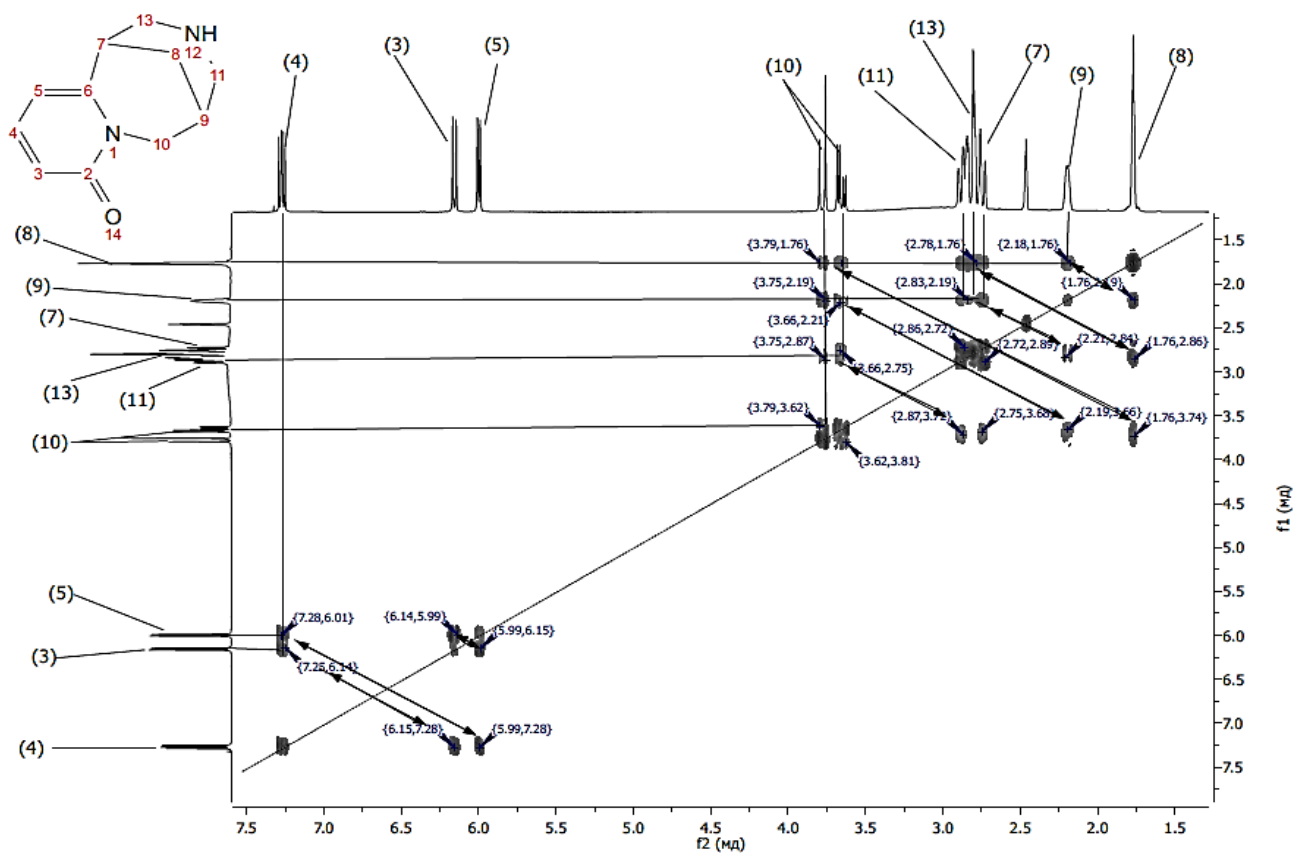


Рисунок 6 – Спектр ЯМР TOCSY (^1H - ^1H) цитизина

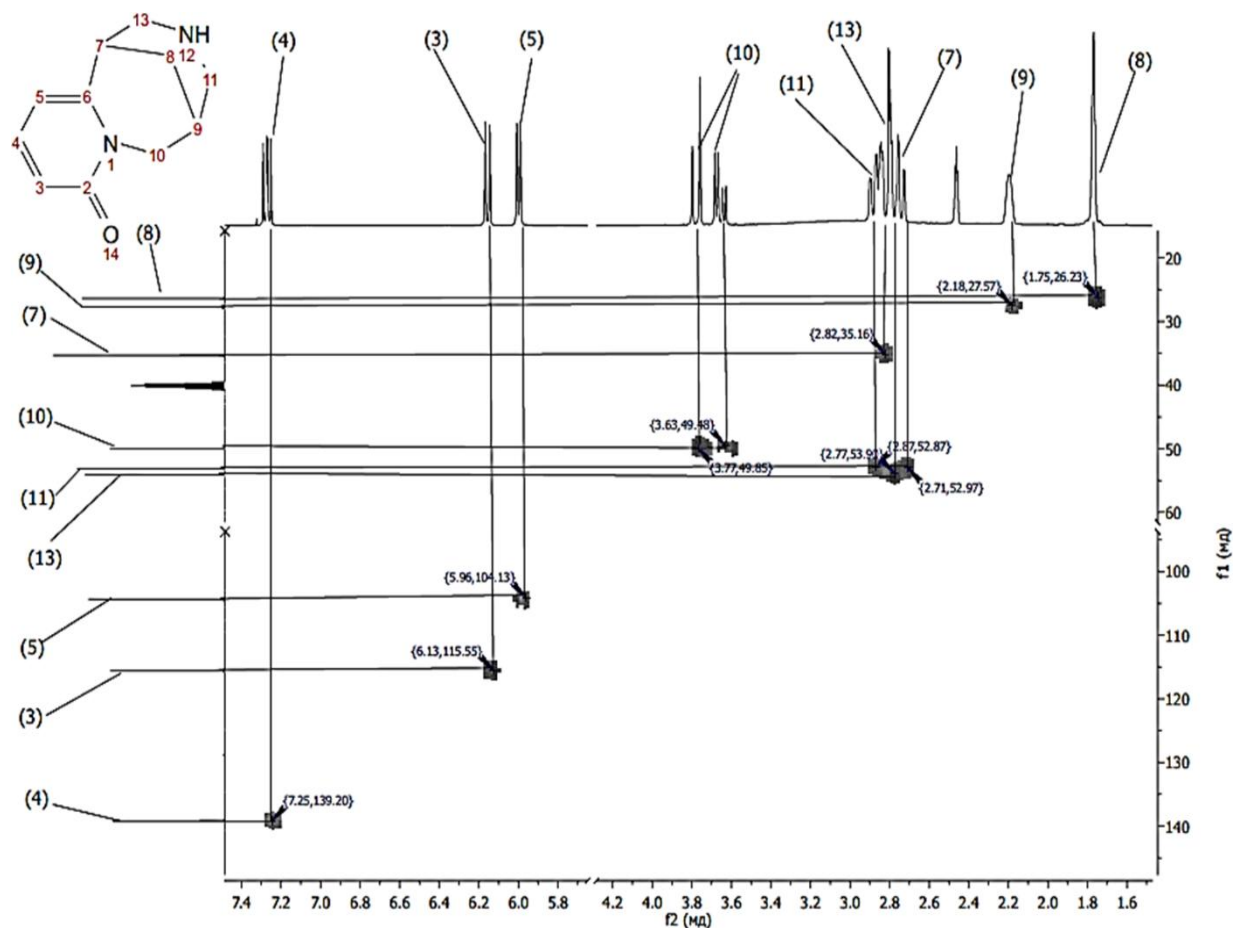


Рисунок 7 – Спектр ЯМР НМРС (^1H - ^{13}C) цитизина

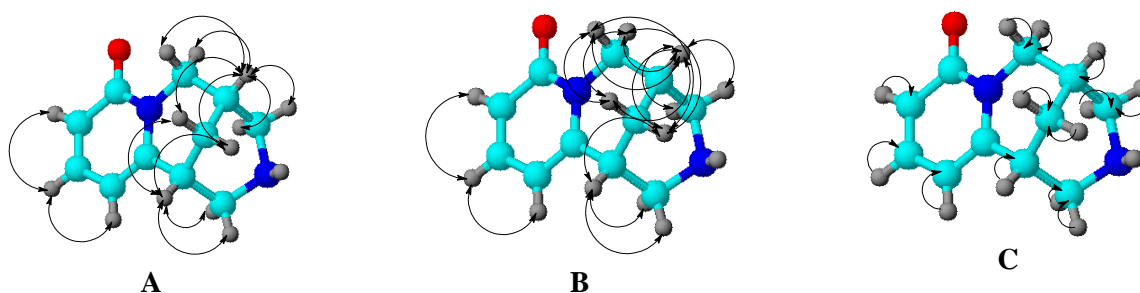


Рисунок 8 – Схема корреляций COSY (^1H - ^1H) (А), TOCSY (^1H - ^1H) (В) и НМРС (^1H - ^{13}C) (С) в молекуле цитизина

В спектре ЯМР ^1H цитафата **2** двухпротонным мультиплетом при 1.81–1.89 м.д. проявились биспидиновые метиленовые протоны Н-8ax и Н-8eq. Соседние с метиленовыми протонами метинные протоны Н-9 и Н-7 резонировали однопротонными уширенным синглетом при 2.33 и мультиплетом при 2.98-3.00 м.д. соответственно. Метиленовые протоны Н-10ax и Н-10eq регистрировались однопротонными дублетом дублета при 3.68 м.д. с ^2J 15.6 и ^3J 6.0 Гц и просто дублетом при 3.82 м.д. с ^2J 15.6 Гц соответственно. Находящиеся по соседству с аминогруппой метиленовые протоны Н-11ax и Н-11eq регистрировались однопротонными мультиплетами при 3.20-3.26 и 3.35-3.39 м.д. соответственно. Другая пара

метиленовых протонов H-13ax и H-13eq резонировала однопротонными мультиплетами при 2.94-2.97 и 2.99-3.03 м.д. соответственно.

Метинные протоны α -хинольдинового ядра проявляются в слабополюной части протонного спектра в виде трех однопротонных дублета дублетов при 6.12 (H-5, 3J 6.8 Гц, 4J 1.2 Гц), 6.19 (H-3, 3J 9.0 Гц, 4J 1.6 Гц) и 7.32 (H-4, 3J 8.6 Гц, 4J 6.8 Гц) м.д.

Протоны H-14,14,14 и H-15,15,15 метокси-групп метоксифосфонатного фрагмента регистрировались трехпротонными дублетами при 3.29 и 3.16 м.д. соответственно с 2J 11.2 Гц

В спектре ЯМР ^{13}C цитафата **2** углеродные атомы биспидинового фрагмента резонировали при 25.16 (C-8), 26.83 (C-9), 34.09 (C-7), 49.46 (C-10), 51.03 (C-11) и 52.16 (C-13) м.д. Углеродные атомы C-14 и C-15 метокси-групп метоксифосфонатного фрагмента регистрировались при 52.71 и 52.54 м.д. соответственно. В наиболее слабополюной области спектра при 104.94 (C-5), 116.19 (C-3), 139.44 (C-4), 151.17 (C-6) и 162.55 (C-2) м.д. регистрировались α -хинольдиновые углеродные атомы.

В спектре ЯМР ^{13}C анализ спектров DEPT указал на наличие в углеродном спектре двух сигналов CH_3 -, четырех сигналов CH_2 - и пяти сигналов CH -групп.

Строение соединения было подтверждено также методами двумерной спектроскопии ЯМР COSY (1H - 1H), TOCSY (1H - 1H) и HMQC (1H - ^{13}C), позволяющей установить спин-спиновые взаимодействия гомо- и гетероядерной природы. Наблюдаемые корреляции в молекуле представлены на рисунке 9.

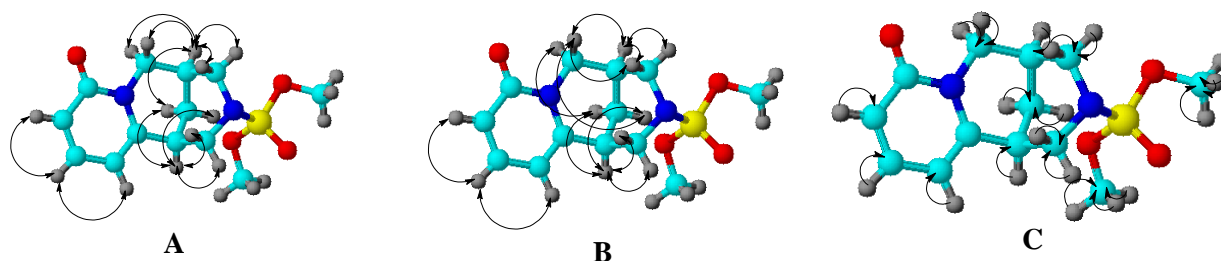


Рисунок 9 – Схема корреляций COSY (1H - 1H) (А), TOCSY (1H - 1H) (В) и HMQC (1H - ^{13}C) (С) в молекуле цитафата

В спектрах ЯМР COSY (1H - 1H) цитафата наблюдаются спин-спиновые корреляции через три связи протонов соседних метилен-метинных и метин-метинных групп протонов трех циклов H⁸-H⁹ (1.84, 2.33 и 2.33, 1.84), H⁸-H⁷ (1.84, 2.98 и 2.98, 1.84), H⁹-H^{10ax} (2.34, 3.68 и 3.68, 2.34), H⁹-H^{10eq} (2.34, 3.83 и 3.83, 2.34), H⁹-H^{11ax} (2.34, 3.25 и 3.25, 2.34), H⁹-H^{11eq} (2.34, 3.37 и 3.37, 2.34), H⁷-H¹³ (2.98, 3.02 и 3.02, 2.98), H⁵-H⁴ (6.11, 7.30 и 7.30, 6.11) и H³-H⁴ (6.19, 7.30 и 7.30, 6.19) м.д.

Гетероядерные взаимодействия протонов с атомами углерода через одну связь были установлены с помощью спектроскопии 1H - ^{13}C HMQC для всех присутствующих в соединении пар: H⁸-C⁸ (1.85, 22.55), H⁹-C⁹ (2.31, 26.66), H^{11ax}-C¹¹ (3.12, 52.30), H^{11eq}-C¹¹ (3.27, 52.30), H⁷-C⁷ (2.99, 33.87), H¹³-C¹³ (3.00, 52.11), H^{10ax}-C¹⁰ (3.65, 49.05), H^{10eq}-C¹⁰ (3.78, 49.21), H⁵-C⁵ (6.07, 104.88), H³-C³ (6.17, 116.04), H⁴-C⁴ (7.29, 139.43), H¹⁴-C¹⁴ (3.29, 52.71) и H¹⁵-C¹⁵ (3.16, 52.54) м.д.

Химические сдвиги ЯМР цитафата в дейтерированном ДМСО, используемые для сравнительного анализа с исходным цитизином, представлены в середине таблицы 1.

Таблица 1 – Химические сдвиги ядер ^1H и ^{13}C ЯМР спектров цитизина и цитафата

№ атома	Группа	Химические сдвиги цитизина 1 (δ_0), м.д.		Химические сдвиги цитафата 2 (δ), м.д.		$\Delta\delta(\delta-\delta_0)$, м.д.		
		CH_x	$\delta(^1\text{H})$	$\delta(^{13}\text{C})$	$\delta(^1\text{H})$	$\delta(^{13}\text{C})$	$\Delta\delta(^1\text{H})$	$\Delta\delta(^{13}\text{C})$
2	>C=O		–	162.85	-	162.55	-	-0.03
3	=CH-		6.15 дд, ^3J 8.0, ^4J 0.8 Гц	115.60	6.19 дд, ^3J 9.0, ^4J 1.6 Гц	116.19	0.04	0.59
4	=CH-		7.27 дд, ^3J 8.8, ^4J 6.8 Гц	139.19	7.32 дд, ^3J 8.6, ^4J 6.8 Гц	139.44	0.05	0.25
5	=CH-		6.00 дд, ^3J 6.8, ^4J 2.8 Гц	104.36	6.12 дд, ^3J 6.8, ^4J 1.2 Гц	104.94	0.02	0.58
6	>C=		–	152.95	-	151.17	-	-1.78
7	>CH-		2.83-2.84 м	35.33	2.98-3.00 м	34.09	0.15	-1.24
8ax	-CH ₂ -		1.77 с	26.41	1.91-1.89 м	25.16	0.13	-1.25
8eq			1.77 с		1.91-1.89 м		0.13	
9	>CH-		2.18 с	27.75	2.33 с	26.83	0.15	-0.92
10ax	-CH ₂ -		3.66 дд, ^2J 15.5, ^3J 6.8 Гц	49.98	3.68 дд, ^2J 15.6, ^3J 6.0 Гц	49.46	0.02	-0.52
10eq			3.78 д, ^2J 15.5 Гц		3.82 д, ^2J 15.6 Гц		0.04	
11ax	-CH ₂ -		2.86-2.87 м	53.16	3.20-3.26 м	51.03	0.37	-2.13
11eq			2.86-2.87 м		3.35-3.39 м		0.51	
12	>NH		2.88 уш.с		-			
13ax	-CH ₂ -		2.80-2.81 м	54.07	2.94-2.97 м	52.16	0.15	-1.91
13eq			2.80-2.81 м		2.99-3.03 м		0.21	
14	-CH ₃		-	-	3.26 д, ^2J 11.2 Гц	52.71		
15	-CH ₃		-	-	3.16 д, ^2J 11.2 Гц	52.54		

Замена в молекуле цитизина аминного протона Н-12 на метокси-фосфатную группу привела к общему незначительному переходу химических сдвигов цитизинового остова в более слабое поле спектра ($\Delta\delta(\delta-\delta_0)=0.02-0.51$ м.д.). Это свидетельствует о общем дезэкранировании цитизинового фрагмента при введении метоксифосфонатной группы. Метоксифосфонатная группа более электроотрицательная в сравнении с цитизиновым фрагментом и обладает отрицательным электронным индуктивным эффектом (-I).

При дезэкранировании цитизинового фрагмента большему электронному воздействию подверглись находящиеся по близости с метоксифосфонатным фрагментов протоны биспидинового цикла Н-11ax,11eq и Н-13ax,13eq ($\Delta\delta(\delta-\delta_0)=0.21-0.51$ м.д.). У расположенные немного далее протонов Н-7, Н-8ax,8eq, Н-9 изменение химических сдвигов сигналов составляло 0.13-0.15 м.д. Наименьшее изменение в увеличении протонных химических сдвигов претерпели наиболее далеко расположенные от метоксифосфонатного фрагмента протоны Н-10ax,10eq биспидиновых циклов и протоны Н-5, Н-4 и Н-3 α -хинальдинового ядра ($\Delta\delta(\delta-\delta_0)=0.02-0.05$ м.д.).

Мультиплетность исследуемых протонных сигналов в цитафате в основном сохранялась с мультиплетностью сигналов, наблюдаемых в спектре цитизина. Причем незначительное изменение протонных химических сдвигов в цитафате приводило к незначительному изменению констант спин-спинового взаимодействия в сравнении с цитизином.

В спектре ЯМР ^1H N-ацилцитизина **3** протоны цитизинового фрагмента проявились мультиплетными сигналами при 1.90-1.93 (1H, Н-3), 2.40-2.46 (2H, Н-12ax,12eq), 2.71-2.81 (1H, Н-2ax), 3.19-3.27 (1H, Н-11), 3.36-3.40 (1H, Н-13ax), 3.69-3.84 (2H, Н-2eq,13eq), 3.92-4.09 (1H, Н-4ax), 4.31-4.52 (1H, Н-4eq), 6.43-6.51 (2H, Н-7, 9) и 7.46-7.50 (1H, Н-8) м.д. Метильные протоны Н-17,17,17 N-ацильного фрагмента резонировали трехпротонным синглетом при 1.84 м.д.

В спектре ЯМР ^{13}C N-ацилцитизина сигналы атомов углерода цитизинового фрагмента наблюдаются при 34.14 (С-3), 34.77 (С-12), 45.71 (С-11), 47.29 (С-13), 48.27 (С-2), 49.85 (С-4), 107.64 (С-9), 115.61 (С-7), 140.58 (С-8), 150.74 (С-10) и 162.29 (С-6). Углеродные атомы N-ацильного фрагмента резонировали при 21.71 (С-17) и 169.12 (С-14) м.д.

Химические сдвиги ЯМР цитизина в дейтерированном ДМСО и N-ацилцитизина представлены в таблице 2 в левой и центральной части соответственно. Замена в молекуле цитизина аминного протона Н-12 на ацетильную группу привела к общему незначительному переходу химических сдвигов цитизина в более слабое поле спектра ($\Delta\delta(\delta-\delta_0)=0.21-0.90$ м.д.). Это свидетельствует о общем дезэкранировании цитизинового фрагмента при введении ацетильной группы.

В рассматриваемой молекуле **3** наблюдалось экранирование протонов Н-9 и Н-11ax биспидиновых колец N-ацилцитизина ($\Delta\delta(\delta-\delta_0)=-0.10 - (-3.26$ м.д.). В N-ацилцитизине, как и в случае цитафата, большее изменение в химических сдвигах претерпевают протоны биспидинового цикла, нежели α -хинальдинового ядра.

Мультиплетность исследуемых протонных сигналов в N-ацилцитизине изменялась от более дискретных к менее дискретным.

Спектр ЯМР ^1H N-циннамоилцитизина **4** характеризуется присутствием в сильнополюной области при 1.86-1.89 и 1.92-1.97 м.д. двух однопротонных мультиплетов протонов Н-8ax и Н-8eq гетероциклического ядра. Протон Н-9 проявился уширенным синглетом при 2.44 м.д. интегралом 1H. Далее проявился мультиплет в области 2.90-3.40 м.д. с интегральной интенсивностью 3H, соответствующий протону Н-7 и аксиальным протоны Н-11ax и Н-13ax.

Таблица 2 – Химические сдвиги ядер ^1H и ^{13}C ЯМР спектров цитизина и N-ацилцитизина

№ атома	Группа	Химические сдвиги цитизина 1 (δ_0), м.д.		Химические сдвиги N-ацилцитизина 3 (δ), м.д.		$\Delta\delta(\delta - \delta_0)$, м.д.	
		CH_x	$\delta(^1\text{H})$	$\delta(^{13}\text{C})$	$\delta(^1\text{H})$	$\delta(^{13}\text{C})$	$\Delta\delta(^1\text{H})$
2 (6)	>C=O	–	162.85	-	162.29	-	-0.56
3 (7)	=CH-	6.15 дд, ^3J 8.0, ^4J 0.8 Гц	115.60	6.43-6.51 м	115.61	0.32	0.01
4 (8)	=CH-	7.27 дд, ^3J 8.8, ^4J 6.8 Гц	139.19	7.46-7.50 м	140.58	0.21	1.39
5 (9)	=CH-	6.00 дд, ^3J 6.8, ^4J 2.8 Гц	104.36	6.43-6.51 м	107.64	0.47	3.28
6 (10)	>C=	–	152.95	-	150.74	-	-2.21
7 (11)	>CH-	2.83-2.84 м	35.33	3.19-3.27 м	45.71	0.40	10.38
8ax (12)	-CH ₂ -	1.77 с	26.41	2.40-2.46 м	34.77	0.66	8.36
8eq (12)		1.77 с		2.40-2.46 м		0.66	
9 (3)	>CH-	2.18 с	27.75	1.90-1.93 м	34.14	-0.26	6.39
10ax (4)	-CH ₂ -	3.66 дд, ^2J 15.5, ^3J 6.8 Гц	49.98	3.92-4.06 м	49.85	0.33	-0.13
10eq (4)		3.78 д, ^2J 15.5 Гц		4.31-4.52 м		0.64	
11ax (2)	-CH ₂ -	2.86-2.87 м	53.16	2.71-2.81 м	48.27	-0.10	-4.86
11eq (2)		2.86-2.87 м		3.69-3.84 м		0.90	
12 (1)	>NH	2.88 уш.с		-			
13ax	-CH ₂ -	2.80-2.81 м	54.07	3.36-3.40 м	47.29	0.58	-6.78
13eq		2.80-2.81 м		3.69-3.84 м		0.96	
(14)	-CO-	-	-	-	169.12		
(17)	-CH ₃	-	-	1.84 с	21.71		

Экваториальные протоны Н-11eq и Н-13eq проявились мультиплетным сигналом при 4.24-4.65 м.д. с интегральной интенсивностью 2Н. Два протона Н-10ax,10eq в результате спин-спинового взаимодействия друг с другом, а также спин-спинового расщепления через три связи с протоном Н-9 проявились мультиплетом в области 3.63–3.97 м.д. с интегралом 2Н. Дублет при 6.14 м.д. с интегралом 2Н и 3J 6.1 Гц соответствует протонам Н-3 и Н-5. В области резонирования олефиновых протонов мультиплетом при 6.49-6.75 м.д. проявился ненасыщенный протон Н-15 (1Н), тогда как соседний с ним ненасыщенный протон Н-16 обнаружился вместе с ароматическими протонами Н-18-22 и протоном Н-4 мультиплетом в наиболее слабopольной части спектра с интегральной интенсивностью 7Н при 7.16–7.64 м.д.

В спектре ЯМР ^{13}C N-циннамоилцитизина **4** сигналы атомов углерода гетероциклических колец наблюдаются при 25.95 (С-8), 27.86 (С-9), 35.13 (С-7), 49.05 (С-10), 51.31 (С-11), 53.04 (С-13), 105.29 (С-5), 116.40 (С-3), 139.430. (С-4), 150.47 (С-6) и 162.66 (С-2) м.д. Сигналы с химическими сдвигами при 128.85 и 139.09 м.д. соответствуют атомам углерода С-15 и С-16 соответственно. Углероды ароматического кольца проявились при 129.99 (С-20), 129.24 (С-18,19,21,22) и 141.32-142.17 (С-17). В наиболее слабopольной части спектра при 165.65 м.д. расположился карбонильный атом углерода С-14.

Строение соединения было подтверждено также методом двумерной спектроскопии ЯМР НМРС (^1H - ^{13}C), позволяющей установить спин-спиновые взаимодействия гетероядерной природы. Гетероядерные взаимодействия протонов с атомами углерода через одну связь были установлены для пар: Н⁸-С⁸ (1.96, 26.60), Н⁹-С⁹ (2.44, 28.48), Н⁷-С⁷ (3.13, 35.65), Н^{10ax}-С^{10ax} (3.59, 49.56), Н^{10ax}-С^{10ax} (3.98, 49.58), Н⁵-С⁵ (6.14, 105.76), Н³-С³ (6.12, 116.82) и Н^{18,19,21,22}-С^{18,19,21,22} (7.37, 129.52). Наблюдаемые корреляции НМРС (^1H - ^{13}C) в молекуле представлены на рисунке 10.

Химические сдвиги ЯМР цитизина в дейтерированном ДМСО и N-циннамоилцитизина представлены в таблице 3 в левой и центральной части соответственно. Присоединение к молекуле цитизина атому азота циннамоильной группы, имеющей в своем составе неопределенный фрагмент и ароматический цикл, показал незначительный переход химических сдвигов ^1H ЯМР в более слабое поле спектра ($\Delta\delta(\delta-\delta_0)=0.01-0.77$ м.д.). Это также свидетельствует о имеющемся общем дезэкранировании цитизинового фрагмента при введении циннамоильной группировки. Циннамоильная группировка показывает более высокую электроотрицательность по сравнению с цитизиновым фрагментом и обладает суммарным отрицательным электронным индуктивным эффектом (-I).

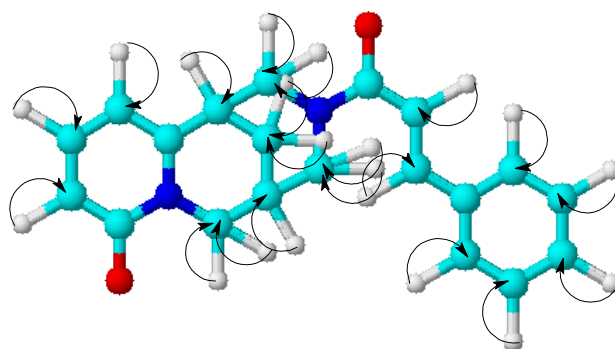


Рисунок 10 – Схема корреляций НМРС (^1H - ^{13}C) в молекуле N-циннамоилцитизина

Таблица 3 – Химические сдвиги ядер ^1H и ^{13}C ЯМР спектров цитизина и N-циннамоилцитизина

№ атома	Группа	Химические сдвиги цитизина 1 (δ_0), м.д.		Химические сдвиги цитафата 4 (δ), м.д.		$\Delta\delta(\delta - \delta_0)$, м.д.	
		CH_x	$\delta(^1\text{H})$	$\delta(^{13}\text{C})$	$\delta(^1\text{H})$	$\delta(^{13}\text{C})$	$\Delta\delta(^1\text{H})$
2	>C=O	–	162.85	-	162.66	-	-0.19
3	=CH-	6.15 дд, ^3J 8.0, ^4J 0.8 Гц	115.60	6.14 д, ^3J 6.1 Гц	116.40	-0.01	0.80
4	=CH-	7.27 дд, ^3J 8.8, ^4J 6.8 Гц	139.19	7.33-7.40 м	139.43	0.10	0.24
5	=CH-	6.00 дд, ^3J 6.8, ^4J 2.8 Гц	104.36	6.14 д, ^3J 6.1 Гц	105.29	0.14	0.93
6	>C=	–	152.95	-	150.47	-	-2.48
7	>CH-	2.83-2.84 м	35.33	3.13 с	35.13	0.30	-0.20
8ax	-CH ₂ -	1.77 с	26.41	1.86-1.89 м	25.95	0.11	-0.46
8eq		1.77 с		1.92-1.97 м		0.18	
9	>CH-	2.18 с	27.75	2.44 с	27.86	0.26	0.11
10ax	-CH ₂ -	3.66 дд, ^2J 15.5, ^3J 6.8 Гц	49.98	3.63-3.97 м	49.05	0.14	-0.93
10eq		3.78 д, ^2J 15.5 Гц		3.63-3.97 м		0.02	
11ax	-CH ₂ -	2.86-2.87 м	53.16	2.85-2.90 м	51.31	0.01	-1.85
11eq		2.86-2.87 м		3.60-3.66 м		0.77	
12	>NH	2.88 уш.с		-			
13ax	-CH ₂ -	2.80-2.81 м	54.07	3.30-3.38 м	53.04	0.54	-1.03
13eq		2.80-2.81 м		3.30-3.38 м		0.54	
14	-CO	-	-	-	165.65		
15	=CH-	-	-	6.49-6.75 м	128.85		
16	=CH-	-	-	7.16-7.44 м	139.09		
17	>C=	-	-	-	141.75		
18,22	=CH-	-	-	7.16-7.64	129.24		
19,21	=CH-	-	-	7.16-7.64	129.24		
20	=CH-	-	-	7.16-7.64	129.99		

При дезэкранировании цитизинового фрагмента большее воздействие претерпевают алициклические протоны Н-11е_q ($\Delta\delta(\delta - \delta_0) = 0.77$ м.д.) и Н-13а_х и Н-13е_q биспидинового фрагмента. Это, вероятно, связано с пространственным близким расположением данных атомов по отношению к электроотрицательной циннамоильной группе и более высокой способностью к электронным перераспределениям циклоалкановых протонов цитизина. Дезэкранирование в меньшей степени происходит у пространственно отдаленных от циннамоильной группы биспидиновых протонов Н-7 ($\Delta\delta = 0.30$ м.д.), Н-8а_х ($\Delta\delta = 0.11$ м.д.), Н-8е_q ($\Delta\delta = 0.18$ м.д.), Н-9 ($\Delta\delta = 0.26$ м.д.), Н-10а_х ($\Delta\delta = 0.14$ м.д.) и Н-10е_q ($\Delta\delta = 0.02$ м.д.). В меньшей степени дезэкранирование цитизинового фрагмента происходит в ее ароматической части у α -хинальдиновых протонов Н-4 ($\Delta\delta = 0.10$ м.д.) и Н-5 ($\Delta\delta = 0.14$ м.д.).

У протона Н-3 данного фрагмента молекулы наблюдается очень незначительное экранирование с уменьшением химического сдвига на 0.01 м.д. по сравнению с незамещенным цитизином. Данные результаты можно объяснить с отдаленностью рассматриваемого цикла от циннамоильной группы и угасанием отрицательного эффекта с расстоянием в химических соединениях. На повышенную устойчивость к электронным смещениям также влияет ароматическая природа α -хинальдинового цикла.

Мультиплетность исследуемых протонных сигналов в N-циннамоилцитизине в основном изменялась от более дискретных к менее дискретным. Так протон Н-4 в цитизине, проявляющийся при 7.27 м.д. дублетом дублета с константами спин-спинового взаимодействия 3J 8.8 Гц и 4J 6.8 Гц в N-циннамоилцитизине регистрировался только мультиплетным сигналом в области 7.33-7.40 м.д. Увеличение размера исследуемой молекулы – N-циннамоилцитизина – в сравнении с исходным соединением – цитизином – приводит к уменьшению чувствительности спектрометра.

Экспериментальная часть

Спектры ЯМР 1H и ^{13}C соединений **2-6** снимали на спектрометре JNM-ECA Jeol 400 (частота 399.78 и 100.53 МГц соответственно) с использованием растворителя ДМСО- d_6 . Химические сдвиги измерены относительно сигналов остаточных протонов или атомов углерода ДМСО- d_6 .

*Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки
Министерства образования и науки РК (грант по ПЦФ № BR10965230)*

Литература:

1. Chizhik V.I., Chernyshev Y.S., Donets A.V., Frolov V.V., Komolkin A.V., Shelyapina M. G. Magnetic Resonance and Its Applications. – Heidelberg: Springer International Publishing, 2014. – 782 p.
2. Sanders J. K. M., Hunter B. K. Modern NMR Spectroscopy. A Guide for Chemists. – Oxford: Oxford University Press, 1993. – 128 p.
3. Kemelbekov U., Saipov A., Abdildanova A., Ospanov I., Luo Y., Guskov A., Saenger W., Imachova Sh., Nasyrova S., Pichkhadze G. Structure and pharmacological studies of the anaesthetic 1-(3-n-butoxypropyl)-4-benzoyloxypiperidin hydrochloride and its complex with β -cyclodextrin in solution. NMR and IR-spectroscopy data // J. Incl. Phenom. Macrocycl. Chem. – 2013. – Vol. 77, Issue 1–4. – P. 249–257.
4. Kaldybekova G.M., Kemel'bekov U.S., Abdildanova A.A., Praliev K.D., Volynkin V.A., Nasyrova S.R., Imashova Sh.O., Pichkhadze G.M. Preparation of an inclusion complex of 1-(3-n-butoxypropyl)-4-

vinylacetylen-4-benzoiloxypiperidine with β -cyclodextrin and its local anesthetic activity // *Pharmaceutical Chemistry Journal*. – 2014. – Vol. 48, N 3. – P. 196–200.

5. Butkus E.P., Martins J.C. ¹H NMR study of inclusion of substituted bicyclo[3.3.1]nonanes in α - and β -cyclodextrins // *Russian Chemical Bulletin*. – 1995. – Vol. 44, N 12. – P. 2420–2422.

6. Seilkhanov T.M., Nazarenko L.A., Poplavskii N.N., Seilkhanov O.T., Iskakova T.K., Praliev K.D., Abzhapparov A.A., Zharkinbekov T.N. NMR Study of Supramolecular Inclusion Complexes of 7-[2-(Morpholin-4-yl)ethyl]-3-(2-ethoxyethyl)-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane with Cyclodextrins // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2015. – Vol. 85, N. 5. – P. 1098–1102.

7. Нуркенов О.А., Сейлханов Т.М., Фазылов С.Д., Исаева А.Ж., Кабиева С.К., Такибаева А.Т. Получение и исследование супрамолекулярного комплекса включения цитизина с β -циклодекстрином // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015. – N 7. – С. 223–226.

8. Нуркенов О.А., Сейлханов Т.М., Фазылов С.Д., Исаева А.Ж., Кабиева С.К., Такибаева А.Т. ЯМР-спектроскопическое изучение супрамолекулярного наноконплекса цитафата с β -циклодекстрином // *Успехи современного естествознания*. – 2015. – N 1. – С. 1124–1138.

9. Nurkenov O.A., Nurmaganbetov Z.S., Seilkhanov T.M., Fazylov S.D., Manasheva V.M., Zhasymbekova A.R., Serikbolov A.S. Synthesis and structured N-acyl and thiourea derivatives citizine and anabazine // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan – Series Chemistry and Technology*. – 2020. – Vol. 1, N 439. – P. 37–461. – P. 37–46.

10. Nurkenov O.A., Nurmaganbetov Zh.S., Seilkhanov T.M., Fazylov S.D., Satpayeva Zh.B., Turdybekov K.M., Talipov S.A., Seydakhmetova R.B. Synthesis, Structure, and Biological Activity of Cinnamoyl-Containing Cytisine and Anabazine Alkaloids Derivatives // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2019. – Vol. 89, Issue 10. – P. 2044–2051.

11. Нурмаганбетов Ж.С., Нуркенов О.А., Фазылов С.Д., Сейлханов О.Т., Жолдасбаев М.Е., Жакишева Б.М., Ибраев М.К. Синтез и строение п-ацилпроизводных алкалоида цитизин // *Известия НТО «КАХАК»*. – 2018. – N 3 (62). – С. 80–86.

References:

1. Chizhik V.I., Chernyshev Y.S., Donets A.V., Frolov V.V., Komolkin A.V., Shelyapina M. G. *Magnetic Resonance and Its Applications*. – Heidelberg: Springer International Publishing, 2014. – 782 p.

2. Sanders J. K. M., Hunter B. K. *Modern NMR Spectroscopy. A Guide for Chemists*. – Oxford: Oxford University Press, 1993. – 128 p.

3. Kemelbekov U., Saipov A., Abdildanova A., Ospanov I., Luo Y., Guskov A., Saenger W., Imachova Sh., Nasyrova S., Pichkhadze G. Structure and pharmacological studies of the anaesthetic 1-(3-n-butoxypropyl)-4-benzoyloxypiperidin hydrochloride and its complex with β -cyclodextrin in solution. NMR and IR-spectroscopy data // *J. Incl. Phenom. Macrocycl. Chem.* – 2013. – Vol. 77, Issue 1–4. – P. 249–257.

4. Kaldybekova G.M., Kemel'bekov U.S., Abdildanova A.A., Praliev K.D., Volynkin V.A., Nasyrova S.R., Imashova Sh.O., Pichkhadze G.M. Preparation of an inclusion complex of 1-(3-n-butoxypropyl)-4-vinylacetylen-4-benzoiloxypiperidine with β -cyclodextrin and its local anesthetic activity // *Pharmaceutical Chemistry Journal*. – 2014. – Vol. 48, N 3. – P. 196–200.

5. Butkus E.P., Martins J.C. ¹H NMR study of inclusion of substituted bicyclo[3.3.1]nonanes in α - and β -cyclodextrins // *Russian Chemical Bulletin*. – 1995. – Vol. 44, N 12. – P. 2420–2422.

6. Seilkhanov T.M., Nazarenko L.A., Poplavskii N.N., Seilkhanov O.T., Iskakova T.K., Praliev K.D., Abzhapparov A.A., Zharkinbekov T.N. NMR Study of Supramolecular Inclusion Complexes of 7-[2-(Morpholin-4-yl)ethyl]-3-(2-ethoxyethyl)-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane with Cyclodextrins // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2015. – Vol. 85, N. 5. – P. 1098–1102.

7. Nurkenov O.A., Sejlhanov T.M., Fazylov S.D., Isaeva A.Zh., Kabieva S.K., Takibaeva A.T. Poluchenie i issledovanie supramolekuljarnogo kompleksa vkljuchenija citizina s

β -ciklodekstrinom // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2015. – N 7. – S. 223–226.

8. Nurkenov O.A., Sejlhanov T.M., Fazylov S.D., Isaeva A.Zh., Kabieva S.K., Takibaeva A.T. JaMR-spektroskopicheskoe izuchenie supramolekuljarnogo nanokompleksa citafata s β -ciklodekstrinom // Uspehi sovremennogo estestvoznanija. – 2015. – N 1. – S. 1124–1138.

9. Nurkenov O.A., Nurmaganbetov Z.S., Seilkhanov T.M., Fazylov S.D., Manasheva V.M., Zhasymbekova A.R., Serikbolov A.S. Synthesis and structured N-acyl and thiourea derivatives citizine and anabazine // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan – Series Chemistry and Technology. – 2020. – Vol. 1, N 439. – P. 37–461. – P. 37–46.

10. Nurkenov O.A., Nurmaganbetov Zh.S., Seilkhanov T.M., Fazylov S.D., Satpayeva Zh.B., Turdybekov K.M., Talipov S.A., Seydakhmetova R.B. Synthesis, Structure, and Biological Activity of Cinnamoyl-Containing Cytisine and Anabasine Alkaloids Derivatives // Russian Journal of General Chemistry. – 2019. – Vol. 89, Issue 10. – P. 2044–2051.

11. Nurmaganbetov Zh.S., Nurkenov O.A., Fazylov S.D., Sejlhanov O.T., Zholdasbaev M.E., Zhakisheva B.M., Ibraev M.K. Sintez i stroenie n-acilproizvodnyh alkaloida citizin // Izvestija NTO «КАХАК». – 2018. – N 3 (62). – S. 80–86.

Поступила 10 декабря 2021 г.

МРНТИ 31.21.27 + 31.21.15

УДК 547.94

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ ОДНО- И ДВУМЕРНОЙ ЯМР-СПЕКТРОСКОПИИ АНАБАЗИНА И ЕГО СИНТЕТИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДНЫХ

Сейлханов О.Т.¹, Махметова Г.¹, Нурмаганбетов Ж.С.², Нуркенов О.А.²,
Сейлханов Т.М.¹

¹Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова, Кокшетау

²Институт органического синтеза и углекислотной химии Республики Казахстан, Караганда
Республика Казахстан

e-mail: tseilkhanov@mail.ru, nurkenov_oral@mail.ru

В работе идентифицированы методом ЯМР-спектроскопии растительный алкалоид пиридинового ряда анабазин, а также некоторые его синтетические производные, такие как анабазиния О,О-диметилтиофосфата, N-ацетонитриланабазин и N-циннамоиланабазин. Использование возможностей ЯМР-спектроскопии высокого разрешения и применение методов одно- и двумерной спектроскопии, таких как COSY (¹H-¹H) и НМРС (¹H-¹³C) ЯМР, позволило установить спин-спиновые взаимодействия гомо- и гетероядерной природы в рассматриваемых соединениях и однозначно и точно идентифицировать строение анабазина и его производных.

Рассмотрены изменения химических сдвигов и мультиплетности сигналов ¹H ЯМР и ¹³C ЯМР в анабазиновом фрагменте при N-протонировании диметилтиофосфорной кислотой и введении в ее состав ацетонитрильной и циннамоильной групп. Полученные результаты рассмотрены с использованием понятий экранирования и дезэкранирования ядер атомов, влияния электронного индуктивного эффекта функциональной группы и пространственного расположения взаимовлияющих атомов и их устойчивости к электронным возмущениям. Определена сопоставительная сила дезэкранирующего влияния рассматриваемых функциональных групп на анабазиновый молекулярный остов. Обсуждены изменения мультиплетности спектров анабазина при введении функциональных групп.

Ключевые слова: алкалоид анабазин, анабазиния О,О-диметилтиофосфат, N-ацетонитриланабазин, N-циннамоиланабазин, одно- и двумерная спектроскопия ЯМР.

Пиридин қатарындағы өсімдік алкалоид анабазин, сондай-ақ оның кейбір синтетикалық туындылары, мысалы, анабазиниум О,О-диметилтиофосфаты, N-ацетонитриланабазин және N-циннамоиланабазин ЯМР-спектроскопиясы арқылы анықталды. Жоғары ажыратымдылықтағы ЯМР спектроскопиясының мүмкіндіктерін пайдалану және DEPT NMR, COZY (¹H-¹H), TOCSY (¹H-¹H), НМРС (¹H-¹³C) ЯМР сияқты бір- және екіөлшемді спектроскопия әдістерін қолдану қарастырылып отырған қосылыстарда гомо- және гетеронуклеарлы табиғаттың спиндік әсерлесуін орнатуға және анабазин мен оның туындыларының құрылымын бір мағыналы және дәл анықтауға мүмкіндік береді.

Диметилтиофосфор қышқылымен N-протондау кезінде анабазин фрагментіндегі ¹H ЯМР және ¹³C ЯМР сигналдарының химиялық ығысуы мен көптігінің өзгеруі және оның құрамына ацетонитрил мен циннамоил топтарының енуі кезінде қарастырылады. Алынған нәтижелер атом ядроларының экранирленуі және дезэкранирленуі, функционалдық топтың электрондық индуктивті әсерінің әсері

және өзара әрекеттесетін атомдардың кеңістікте орналасуы және олардың электрондық бұзылыстарға төзімділігі ұғымдарын қолдану арқылы қарастырылады. Қарастырылып отырған функционалдық топтардың анабазиннің молекуласына дезакранирлеу әсерінің салыстырмалы күші анықталды. Функционалдық топтарды енгізу кезінде анабазин спектрлерінің мультиплеттілігінің өзгеруі талқыланады.

Түйінді сөздер: анабазин алкалоидты, анабазиниум *O,O*-диметилтиофосфаты, *N*-ацетонитриланабазин, *N*-циннамойланбазин, бір және екі өлшемді ЯМР спектроскопиясы

*The plant alkaloid anabasine of the pyridine series, as well as some of its synthetic derivatives, such as anabasinium *O,O*-dimethylthiophosphate, *N*-acetonitrileanabazine, and *N*-cinnamoylanabazine, were identified by NMR spectroscopy. Using the capabilities of high-resolution NMR spectroscopy and the use of one- and two-dimensional spectroscopy methods, such as COSY (^1H - ^1H) and HMQC (^1H - ^{13}C) NMR, made it possible to establish spin-spin interactions of a homo- and heteronuclear nature in the compounds under consideration and unambiguously and accurately identify the structure of anabasine and its derivatives.*

*Changes in the chemical shifts and multiplicity of ^1H NMR and ^{13}C NMR signals in the anabasine fragment upon *N*-protonation with dimethylthiophosphoric acid and the introduction of acetonitrile and cinnamoyl groups into its composition are considered. The results obtained are considered using the concepts of screening and descreening of atomic nuclei, the influence of the electronic inductive effect of the functional group, and the spatial arrangement of interacting atoms and their resistance to electronic disturbances. The comparative strength of the deshielding effect of the considered functional groups on the anabasine molecular backbone was determined. The changes in the multiplicity of the spectra of anabasine upon the introduction of functional groups are discussed.*

Keywords: alkaloid anabasine, anabasinium *O,O*-dimethylthiophosphate, *N*-acetonitrilanabazine, *N*-cinnamoylanabazine, one- and two-dimensional NMR spectroscopy.

Одним из современных методов исследования строения органических соединений является спектроскопия ЯМР [1, 2]. Данный метод идентификации органических соединений успешно используется в мировой практике уже более полувека. Использование современных спектрометров ЯМР высокого разрешения позволяет полно и детально идентифицировать исследуемые вещества [3–6].

В настоящее время использование возможностей ЯМР спектроскопии высокого разрешения и применение методов одно- и двумерной спектроскопии, таких как DEPT ЯМР, COSY (^1H - ^1H), TOCSY (^1H - ^1H), NOESY (^1H - ^1H), ROESY (^1H - ^1H), HMQC (^1H - ^{13}C), HMSC (^1H - ^{13}C) ЯМР, позволяющей установить спин-спиновые взаимодействия гомо- и гетероядерной природы, делают возможным однозначно и точно идентифицировать строение большого числа изучаемых соединений.

В данной работе нами проведена ЯМР-спектроскопическая идентификация алкалоида пиридинового ряда анабазина **1**, извлеченного из растительного казахстанского сырья, а также некоторых его синтетических производных, таких как анабазиниум *O,O*-диметилтиофосфат **2**, *N*-ацетонитриланабазин **3** и *N*-циннамоиланабазин **4** (рисунок 1).

Алкалоид пиридинового ряда анабазин растительного происхождения, а также его производные были впервые синтезированы или получены новыми способами в лаборатории синтеза биологически активных веществ Института органического синтеза и углехимии РК в г. Караганде под руководством д.х.н., профессора Нуркенова О.А. и его сотрудниками и любезно предоставлены для ЯМР-спектроскопических исследований в лабораторию ЯМР-спектроскопии Кокшетауского университета им. Ш. Уалиханова. Их характеристики соответствовали данным, ранее опубликованным авторами [7–11].

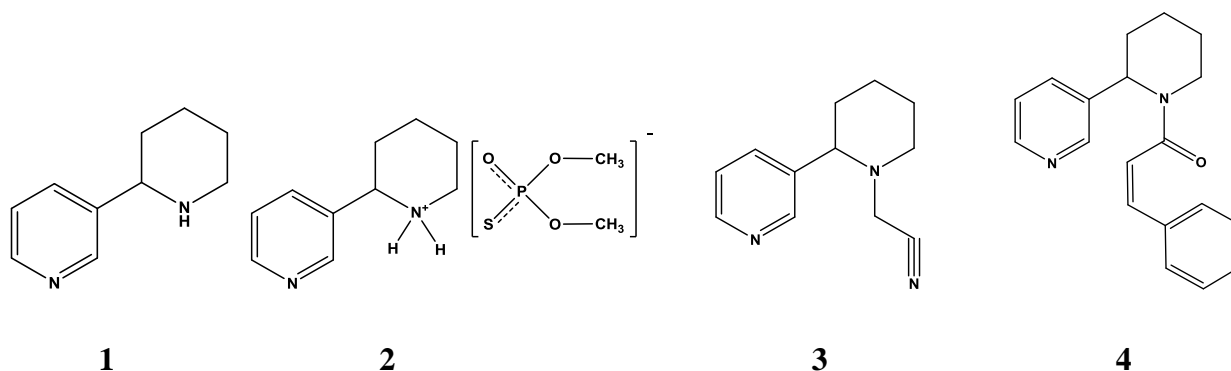
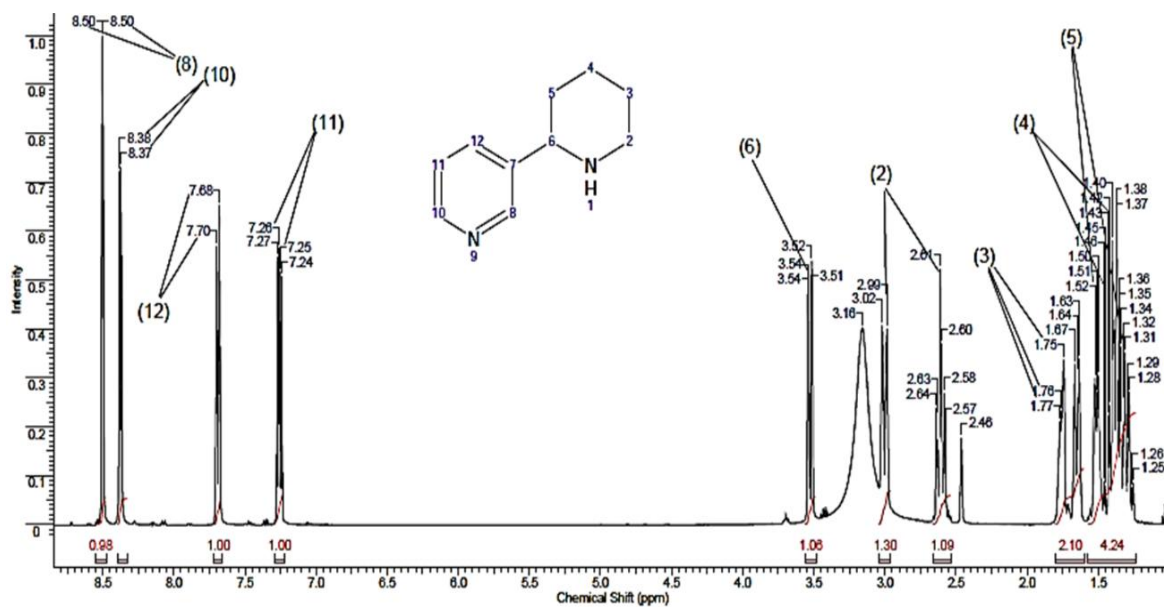


Рисунок 1 – Структурные формулы анабазина (1), анабазиния О,О-диметилтиофосфата (2), N-ацетонитриланабазина (3) и N-циннамоиланабазина (4)

В спектре ЯМР ^1H анабазина **1** (рисунок 2) пиперидиновые протоны проявились мультиплетными сигналами при 1.29-1.35 (1H, H-5ax), 1.36-1.43 (2H, H-3ax, 4ax), 1.50-1.53 (1H, H-4eq), 1.64-1.67 (1H, H-5eq) и 1.75-1.77 (1H, H-3eq) м.д. Метиленовые протоны H-2ax и H-2eq проявились однопротонными дублетом триплета при 2.61 с ^3J 11.7 Гц, ^4J 2.7 Гц и однопротонным мультиплетом при 2.99-3.02 м.д. соответственно. Метиленовые протоны H-2ax и H-2eq регистрировались однопротонными дублетом триплета при 2.61 с ^3J 11.7 Гц и ^4J 2.7 Гц и мультиплетом при 2.99-3.02 м.д. соответственно. Метинный протон H-6 проявился однопротонным дублетом дублета при 3.53 м.д. с ^3J 11.0 Гц и ^4J 2.4 Гц. Аминный протон H-1 резонировал уширенным синглетом при 3.15 м.д.



No.	(ppm)	(Hz)	Height	No.	(ppm)	(Hz)	Height	No.	(ppm)	(Hz)	Height	No.	(ppm)	(Hz)	Height
1	1.25	500.5	0.0852	14	1.42	568.3	0.2450	27	2.46	985.0	0.1767	40	3.54	1413.7	0.4358
2	1.26	503.7	0.0756	15	1.43	571.5	0.2238	28	2.47	988.8	0.1279	41	3.54	1416.4	0.4722
3	1.28	512.9	0.2695	16	1.45	580.6	0.0806	29	2.57	1026.4	0.1818	42	7.24	2895.1	0.5074
4	1.29	515.6	0.1714	17	1.46	583.9	0.0895	30	2.58	1032.2	0.2697	43	7.25	2900.2	0.5184
5	1.31	523.9	0.3527	18	1.50	600.3	0.3069	31	2.60	1040.9	0.3696	44	7.26	2902.9	0.5855
6	1.32	527.5	0.2542	19	1.51	602.6	0.2694	32	2.61	1043.6	0.5222	45	7.27	2907.9	0.5479
7	1.34	535.8	0.3644	20	1.52	608.6	0.2995	33	2.63	1052.8	0.2235	46	7.68	3070.0	0.6632
8	1.35	539.0	0.3707	21	1.63	653.5	0.3399	34	2.64	1055.5	0.2376	47	7.70	3077.8	0.5702
9	1.36	542.2	0.1616	22	1.64	656.2	0.3118	35	2.99	1193.4	0.4004	48	8.37	3345.3	0.7138
10	1.37	547.2	0.8282	23	1.67	665.8	0.3291	36	3.02	1207.1	0.4081	49	8.37	3347.1	0.7305
11	1.38	550.4	0.4975	24	1.75	697.9	0.3372	37	3.16	1263.0	0.4014	50	8.38	3350.3	0.7231
12	1.39	568.4	0.5110	25	1.76	704.3	0.2316	38	3.51	1403.1	0.4795	51	8.50	3367.5	0.9992
13	1.40	569.1	0.5819	26	1.77	707.5	0.2118	39	3.52	1405.4	0.5393	52	8.50	3369.8	1.0000

No.	(ppm)	Value	Absolute Value
1	[1.23 .. 1.57]	4.242	7.42240e+1
2	[1.60 .. 1.80]	2.098	3.67186e+1
3	[2.54 .. 2.66]	1.090	1.90737e+1
4	[2.96 .. 3.04]	1.298	2.27171e+1
5	[3.46 .. 3.56]	1.059	1.85290e+1
6	[7.23 .. 7.29]	1.000	1.74983e+1
7	[7.66 .. 7.72]	0.999	1.74765e+1
8	[8.33 .. 8.39]	0.968	1.69450e+1
9	[8.48 .. 8.56]	0.984	1.72214e+1

Рисунок 2 – Спектр ЯМР ^1H анабазина

Пиридиновые протоны анабазина регистрировались дублетами дублета при 7.26 (1H, H-11, s^3J 7.8 Гц и 4J 5.0 Гц), и 8.38 (1H, H-10, s^3J 4.8 Гц и 4J 4.0 Гц) м.д., дублетом триплета при 7.68 (1H, H-12, s^3J 8.0 Гц и 4J 2.0 Гц) и дублетом 8.50 (1H, H-8, 4J 4.0 Гц) м.д.

В спектре ЯМР ^{13}C анабазина 1 (рисунок 3) углеродные атомы пиперидинового фрагмента резонировали при 25.51 (C-3), 25.97 (C-4), 35.38 (C-5), 47.20 (C-2) и 59.37 (C-6) м.д. Пиридиновые углеродные атомы проявились в наиболее слабополюной области спектра при 123.66 (C-11), 134.52 (C-12), 141.60 (C-7) и 148.51 (C-8, 10) м.д.

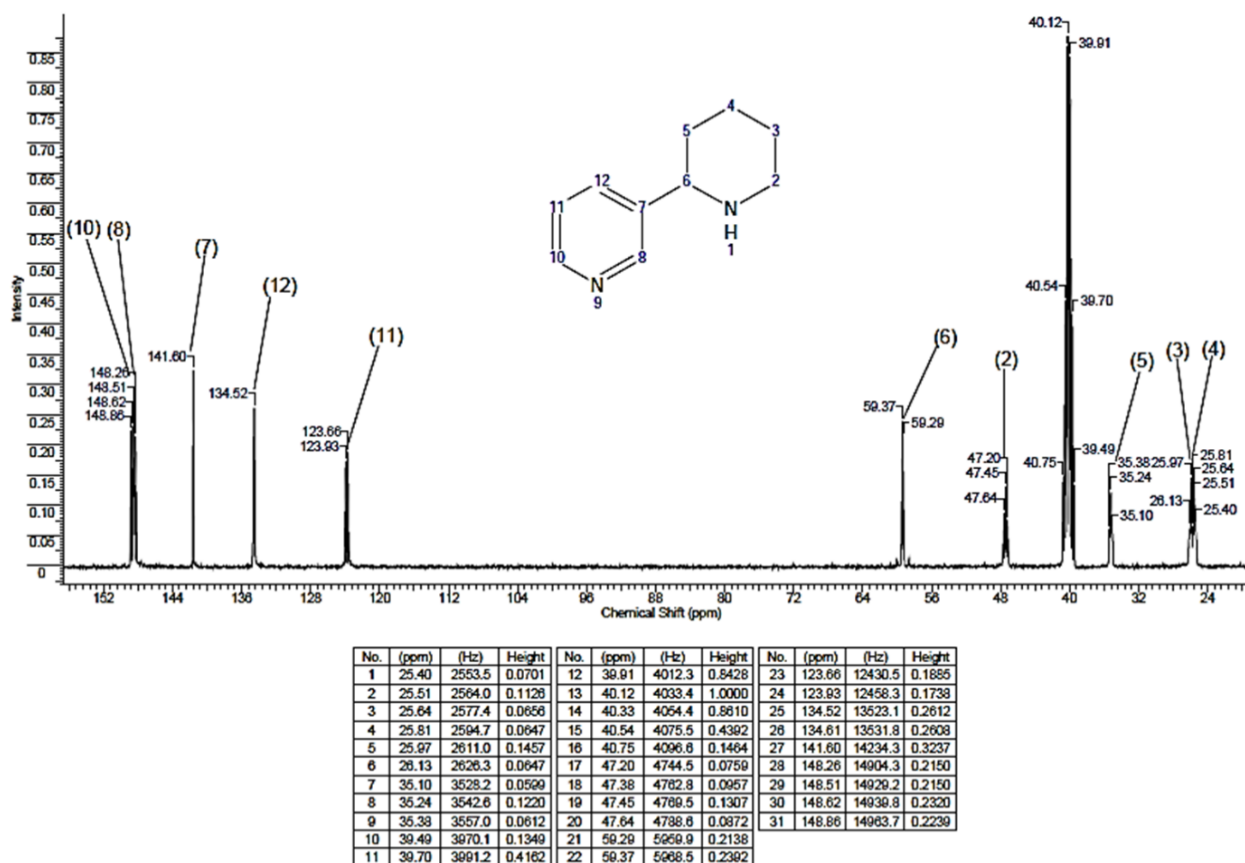


Рисунок 3 – Спектре ЯМР ^{13}C анабазина

Строение соединения было подтверждено также методами двумерной спектроскопии ЯМР COSY (1H - 1H) (рисунок 4) и HMQC (1H - ^{13}C) (рисунок 5), позволяющей установить спин-спиновые взаимодействия гомо- и гетероядерной природы. Наблюдаемые корреляции в молекуле анабазина представлены на рисунке 6.

В спектрах ЯМР COSY (1H - 1H) анабазина (рисунок 4) наблюдаются спин-спиновые корреляции через три связи протонов соседних метилен-метиленовых, метилен-метинных и метин-метинных групп протонов двух циклов H^{5ax} - H^{4ax} (1.36, 1.48 и 1.48, 1.36), H^{5ax} - H^{5eq} (1.32, 1.63 и 1.63, 1.32), H^{4ax} - H^{3eq} (1.38, 1.75 и 1.75, 1.38), H^{3ax} - H^{2ax} (1.36, 2.60 и 2.60, 1.36), H^{3ax} - H^{2eq} (1.35, 2.97 и 2.97, 1.35), H^{5ax} - H^6 (1.28, 3.51 и 3.51, 1.28), H^{5eq} - H^6 (1.62, 3.51 и 3.51, 1.62), H^{2ax} - H^{2eq} (2.58, 2.98 и 2.98, 2.58), H^{11} - H^{12} (7.23, 7.68 и 7.68, 7.23) и H^{11} - H^{10} (7.22, 8.36 и 8.36, 7.22) м.д.

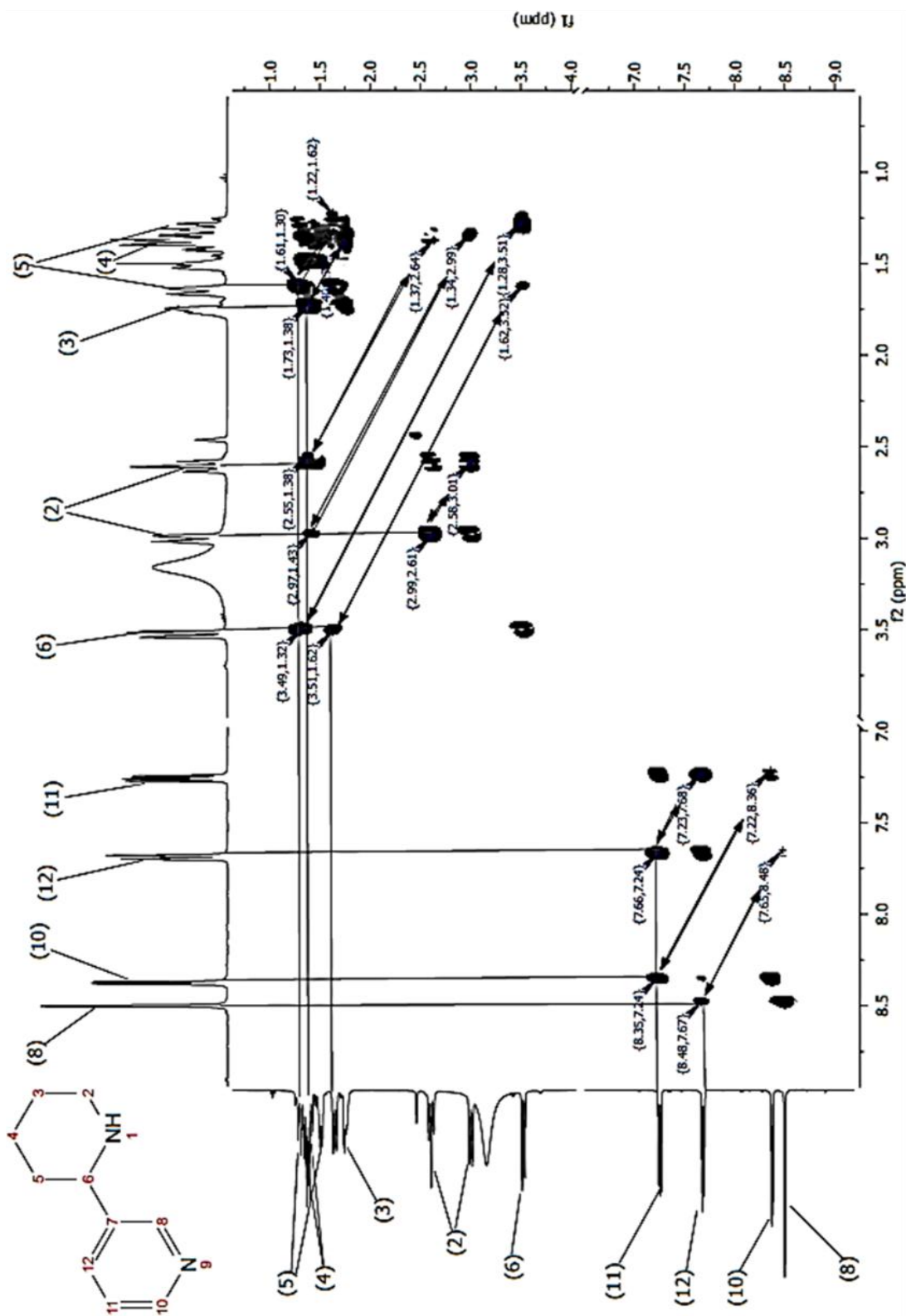


Рисунок 4 – Спектр ЯМР COSY (^1H - ^1H) анабазина

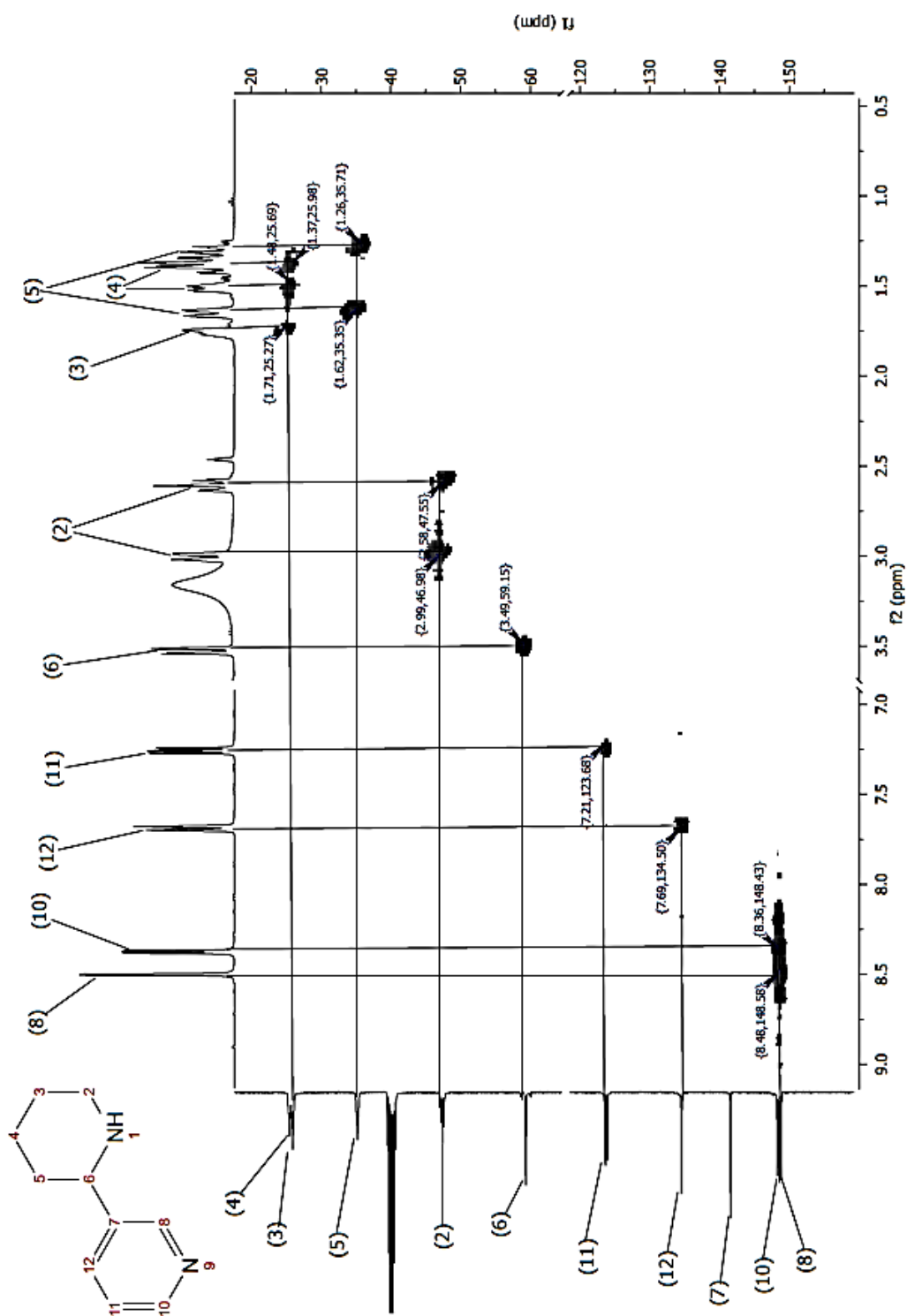


Рисунок 5 – Спектре ЯМР НМҚС (^1H - ^{13}C) анабазина

Гетероядерные взаимодействия протонов с атомами углерода через одну связь были установлены с помощью спектроскопии ^1H - ^{13}C НМРС (рисунок 5) для следующих присутствующих в соединении пар: $\text{H}^{4\text{ax}}\text{-C}^4$ (1.37, 26.08), $\text{H}^{5\text{ax}}\text{-C}^5$ (1.26, 35.7), $\text{H}^{3\text{eq}}\text{-C}^3$ (1.75, 24.77), $\text{H}^{5\text{eq}}\text{-C}^5$ (1.65, 34.71), $\text{H}^{2\text{ax}}\text{-C}^2$ (2.60, 49.47), $\text{H}^{2\text{eq}}\text{-C}^2$ (2.99, 46.81), $\text{H}^6\text{-C}^6$ (3.51, 59.29), $\text{H}^{11}\text{-C}^{11}$ (7.21, 123.68), $\text{H}^{12}\text{-C}^{12}$ (7.69, 134.50), $\text{H}^{10}\text{-C}^{10}$ (8.36, 148.43) и $\text{H}^8\text{-C}^8$ (8.48, 148.58) м.д.

Химические сдвиги ЯМР анабазина в дейтерированном ДМСО, используемые для сравнительного анализа с его производными – анабазины О,О-диметилтиофосфата, представлены в таблице 1 в центральной ее части.

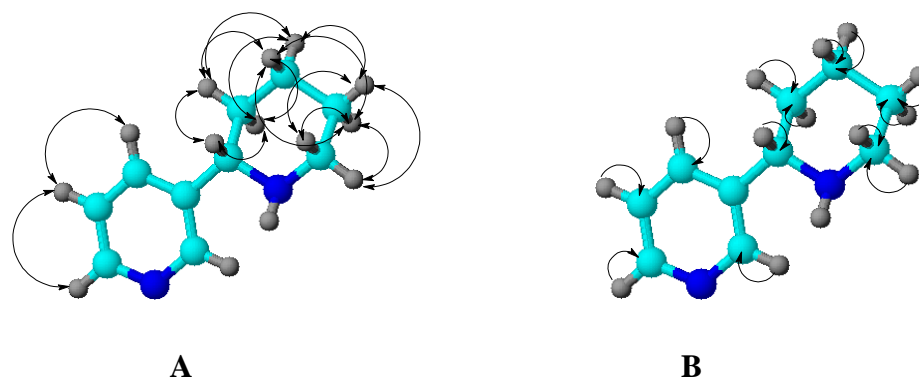


Рисунок 6 – Схема корреляций COSY (^1H - ^1H) (А) и НМРС (^1H - ^{13}C) (В) в молекуле анабазина

В спектре ЯМР ^1H анабазины О,О-диметилтиофосфата пиперидиновые протоны проявились мультиплетными сигналами при 1.54-1.63 (1H, H-10ax), 1.74-1.84 (3H, H-10eq,8ax,9ax), 1.88-1.96 (2H, H-8eq,9eq) и 3.33-3.38 (1H, H-11eq) м.д. Алициклические протоны пиперидинового фрагмента H-11ax и H-7 проявились однопротонными дублетом триплета при 3.00 с ^3J 12.0 и ^4J 4.4 Гц и дублетом дублета при 4.22 м.д. с ^3J 10.8 и ^4J 2.7 Гц соответственно. Аммонийные пиперидиновые протоны H-12a и H-12b регистрировались двухпротонным уширенным синглетом при 9.69 м.д.

Протоны пиридинового фрагмента проявились однопротонными дублетом при 8.67 (H-2 с ^4J 2.0 Гц), двумя дублетами дублетов при 7.41 (H-5 с ^3J 7.8 и ^4J 4.6 Гц) и 8.54 (H-6 с ^3J 4.8 и ^4J 1.6 Гц), а также дублетом триплета при 7.99 (H-4 с ^3J 8.4 и ^4J 1.8 Гц) м.д.

Диметилтиофосфонатные протоны H-16,16,16 и H-18,18,8 проявились шестипротонным дублетом дублета при 3.32 м.д. с ^3J 12.4 и ^4J 3.2 Гц.

В спектре ЯМР ^{13}C углеродные атомы пиперидинового фрагмента резонировали при 21.83 (C-10), 23.07 (C-9), 30.30 (C-8), 45.47 (C-11) и 57.76 (C-7) м.д. Пиридиновые углеродные атомы проявились в наиболее слабopольной области спектра при 124.18 (C-5), 134.18 (C-3), 135.68 (C-4) и 149.58 (C-2) и 150.31 (C-6) м.д. Сигналы с химическими сдвигами при 52.15 и 52.20 м.д. соответствуют диметилтиофосфонатным углеродным атомам C-16 и C-18.

Строение соединения было подтверждено также методами двумерной спектроскопии ЯМР COSY (^1H - ^1H) и НМРС (^1H - ^{13}C), позволяющей установить спин-спиновые взаимодействия гомо- и гетероядерной природы. Наблюдаемые корреляции в основном соответствуют корреляциям, имеющимся в молекуле исходного анабазина, и представлены на рисунке 7.

В спектрах ЯМР COSY (^1H - ^1H) анабазиния О,О-диметилтиофосфата наблюдаются спиновые корреляции через три связи протонов соседних метилен-метиленовых, метилен-метинных и метин-метинных групп протонов двух циклов $\text{H}^{10\text{ax}}\text{-H}^{10\text{eq}}$ (1.58, 1.82 и 1.82, 1.58), $\text{H}^{10\text{eq}}\text{-H}^{11\text{ax}}$ (1.82, 2.96 и 2.96, 1.82), $\text{H}^{11\text{ax}}\text{-H}^{11\text{eq}}$ (2.98, 3.32 и 3.32, 2.98), $\text{H}^{8\text{eq}}\text{-H}^7$ (1.93, 4.21 и 4.21, 1.93), $\text{H}^5\text{-H}^4$ (7.42, 7.99 и 7.99, 7.42) и $\text{H}^5\text{-H}^6$ (7.43, 8.54 и 8.54, 7.43) м.д.

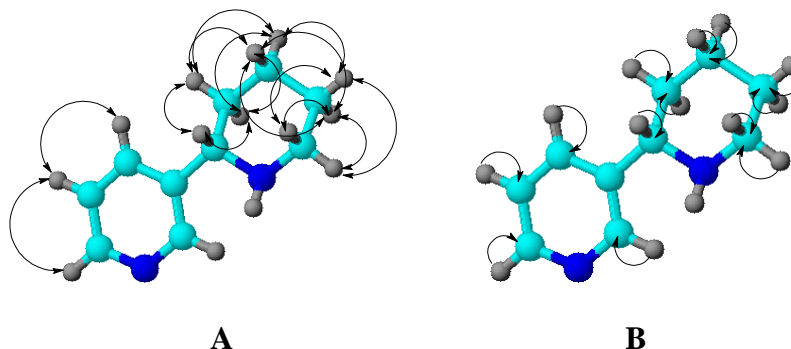


Рисунок 7 – Схема корреляций COSY (^1H - ^1H) (А) и HMQC (^1H - ^{13}C) (В) в молекуле анабазиния О,О-диметилтиофосфата

Гетероядерные взаимодействия протонов с атомами углерода через одну связь были установлены с помощью спектроскопии ^1H - ^{13}C HMQC для следующих присутствующих в соединении пар: $\text{H}^{10\text{ax}}\text{-C}^{10}$ (1.55, 22.82), $\text{H}^{10\text{eq}}\text{-C}^{10}$ (1.89, 22.16), $\text{H}^{9\text{ax}}\text{-C}^9$ (1.69, 30.53), $\text{H}^{9\text{eq}}\text{-C}^9$ (1.97, 30.36), $\text{H}^{11\text{ax}}\text{-C}^{11}$ (3.02, 45.32), $\text{H}^{11\text{eq}}\text{-C}^{11}$ (3.34, 45.31), $\text{H}^{16,18}\text{-C}^{16,18}$ (3.31, 52.09 и 3.35, 52.09), $\text{H}^7\text{-C}^7$ (4.21, 57.63), $\text{H}^5\text{-C}^5$ (7.34, 124.68), $\text{H}^4\text{-C}^4$ (7.98, 135.65), $\text{H}^6\text{-C}^6$ (8.54, 150.19) и $\text{H}^2\text{-C}^2$ (8.68, 149.54) м.д.

Химические сдвиги ЯМР анабазиния О,О-диметилтиофосфата в дейтерированном ДМСО, используемые для сравнительного анализа с исходным анабазином, представлены в середине таблицы 1.

Превращение молекулы анабазина **1** в солевую форму – анабазиния диметилтиофосфата **2** увеличило количество аминных протонов Н-1 до двух. При этом резко увеличилось дезэкранирование аминных протонов и переходу сигналов аминных протонов в слабопольную часть спектра ($\Delta\delta(\delta - \delta_0)=6.54$ м.д.). Переход молекулы анабазина в солевую форму в результате трансформации привел к дезэкранированию всех протонов анабазинового фрагмента. Это свидетельствует о общем дезэкранировании анабазинового фрагмента при переходе ее в ионную форму – анабазиния диметилтиофосфата. Диметилтиофосфатный фрагмент заряжен отрицательно в результате перетягивания электронной пары у протона аммонийного. В результате такого перераспределения электронов анабазиний-ион более дезэкранирован, чем сама молекула анабазина.

В пиперидиновом фрагменте молекулы **2** наибольшее смещение химических сдвигов произошло в протонах Н-6 ($\Delta\delta(\delta - \delta_0)=0.69$ м.д.), расположенных по соседству с аммонийной электроположительной группой. Разницу химических сдвигов в пределах 0.35-0.45 м.д. демонстрировали протоны Н-2_{ax},2_{eq}, Н-4_{ax},4_{eq} и Н-5_{ax}. Наименьшее дезэкранирование протерпели протоны Н-3_{ax},3_{eq} и Н-5_{eq}. Смещение химических сдвигов ядер протонов составляло от 0.03 до 0.27 м.д.

Таблица 1 – Химические сдвиги ядер ^1H и ^{13}C ЯМР спектров анабазина **1** и анабазиния О,О-диметилтиофосфата **2**

№ атома	Группа	Химические сдвиги анабазина 1 (δ_0), м.д.		Химические сдвиги анабазиния О,О-диметилтиофосфата 2 (δ), м.д.		$\Delta\delta(\delta - \delta_0)$, м.д.		
		CH_x	$\delta(^1\text{H})$	$\delta(^{13}\text{C})$	$\delta(^1\text{H})$	$\delta(^{13}\text{C})$	$\Delta\delta(^1\text{H})$	$\Delta\delta(^{13}\text{C})$
1(12)	NH		3.15 уш.с.	-	9.69 уш.с	-	6.54	-
2ax (11)	-CH ₂ -		2.61 дт, ^3J 11.7, ^4J 2.7 Гц	47.20	3.00 дт, ^3J 12.0, ^4J 4.4 Гц	45.47	0.39	-1.73
2eq (11)			2.99-3.02 м		3.33-3.38 м		0.35	
3ax (10)	-CH ₂ -		1.36-1.43 м	25.51	1.54-1.63 м	21.83	0.19	-3.68
3eq 10)			1.75-1.77 м		1.74-1.84 м		0.03	
4ax (9)	-CH ₂ -		1.36-1.43 м	25.97	1.74-1.84 м	23.07	0.40	-2.90
4eq (9)			1.50-1.53 м		1.88-1.96 м		0.41	
5ax (8)	-CH ₂ -		1.29-1.35 м	35.38	1.74-1.84	30.30	0.47	-5.08
5eq (8)			1.64-1.67 м		1.88-1.96		0.27	
6 (7)	>CH-		3.53 дд, ^3J 11.0, ^4J 2.4 Гц.	59.37	4.22 дд, ^3J 10.8, ^4J 2.7 Гц	57.76	0.69	-1.61
7 (3)	>C=		-	141.60	-	134.18	-	-7.42
8 (2)	-CH=		8.50 д, ^4J 4.0 Гц	148.51	8.67 д, ^4J 2.0 Гц	149.58	0.17	1.07
10 (6)	-CH=		8.38 дд, ^3J 4.8, ^4J 4.0 Гц	148.51	8.54 дд, ^3J 4.8, ^4J 1.6 Гц	150.31	1.80	1.80
11 (5)	-CH=		7.26 дд, ^3J 7.8, ^4J 5.0 Гц	123.66	7.41 дд, ^3J 7.8, ^4J 4.6 Гц	124.18	0.15	0.52
12 (4)	-CH=		7.68 дт, ^3J 8.0, ^4J 2.0 Гц	134.52	7.99 дт, ^3J 8.4, ^4J 1.8 Гц	135.68	0.31	1.16
(16)	-OCH ₃				3.32 дд, ^3J 12.4, ^4J 3.2 Гц	52.15, 52.20		
(18)	-OCH ₃				3.32 дд, ^3J 12.4, ^4J 3.2 Гц	52.15, 52.20		

В пиридиновом фрагменте молекулы **2** наибольшее смещение химических сдвигов произошло в протонах Н-10 ($\Delta\delta(\delta - \delta_0) = 1.80$ м.д.) и Н-12 ($\Delta\delta(\delta - \delta_0) = 0.31$ м.д.), расположенных в орта- и пара-положении по отношению пиперидинового заместителя. Химические сдвиги оставшихся протонов составляли 0.15-0.17 м.д. расположенных по соседству с аммонийной электроположительной группой. Мультиплетность исследуемых протонных сигналов в анабазине и анабазиния диметилтиофосфате в основном сохранилась. Приблизительно одинаковые значения имеют константы спин-спинового взаимодействия через три связи. Константы спин-спинового взаимодействия через четыре связи не всегда схожи.

Учитывая, что чувствительность углеродных сигналов ЯМР в сто раз менее чувствительности протонных спектров, больших изменений в их сигналах найдено не было.

Спектр ЯМР ^1H N-ацетонитриланабазина **3** характеризуется присутствием в сильнополюсной области при 1.26-1.36 м.д. мультиплета, соответствующего протонам Н-4ах пиперидинового цикла. Соседние с данным протоном аксиальные и экваториальные протоны пиперидинового цикла Н-3 и Н-5, а также экваториальный протон Н-4е_к проявились более широким мультиплетом при 1.43-1.73 м.д. Аксиальный протон пиперидинового цикла Н-2ах резонировал в спектре дублетом триплета при 2.35 м.д. с ^3J 11.9 Гц и ^4J 2.7 Гц, тогда как экваториальный протон Н-2е_к проявился в более слабом поле уширенным дублетом при 3.00 м.д. с ^3J 11.4 Гц. Оставшийся третичный протон Н-6 пиперидиновой системы из-за наложения с другими сигналами обнаружился мультиплетом при 3.17–3.19 м.д.

Дублетными сигналами при 3.14 и 3.55 м.д. с ^2J 17.8 Гц каждый резонировали протоны Н-7ах и Н-7е_к соответственно ацетонитрильного фрагмента молекулы.

Протоны пиридинового кольца Н-14 резонировали мультиплетом при 7.34-7.37 м.д. Протон Н-11, не имеющий возможности взаимодействовать с другими протонами через три связи, соответственно проявился в виде синглетного сигнала при 8.47 м.д. Протон Н-15 резонировал при 7.67 м.д. дуплетом триплета с ^3J 7.8 Гц и ^4J 1.8 Гц. Мультиплетный сигнал при 8.47-8.48 м.д. соответствует протону Н-13.

В спектре ЯМР ^{13}C N-ацетонитриланабазина **3** сигналы углеродов пиперидинового кольца наблюдаются при 24.52 (С-4), 25.69 (С-3), 35.68 (С-5), 53.42 (С-2) и 63.71 (С-6) м.д. Углеродные атомы пиридинового фрагмента резонировали при 124.55 (С-14), 135.36 (С-15), 138.29 (С-10), 149.27 (С-13) и 149.66 (С-11) м.д. Сигнал с химическим сдвигом при 115.65 м.д. соответствует атому углерода С-8, связанному тройной связью с атомом азота. При 43.78 м.д. резонировал углеродный атом С-7.

Строение соединения было подтверждено также методами двумерной спектроскопии ЯМР НМРС ($^1\text{H}-^{13}\text{C}$), позволяющей установить спин-спиновые взаимодействия гетероядерной природы. Гетероядерные взаимодействия протонов с атомами углерода через одну связь были установлены с помощью спектроскопии $^1\text{H}-^{13}\text{C}$ НМРС для следующих присутствующих в соединении пар: H^4-C^4 (1.31, 24.56), $\text{H}^{5\text{ax}}-\text{C}^{5\text{ax}}$ (1.47, 35.63), $\text{H}^{5\text{eq}}-\text{C}^{5\text{eq}}$ (1.65, 35.61), H^3-C^3 (1.69, 25.57), $\text{H}^{2\text{ax}}-\text{C}^{2\text{ax}}$ (2.34, 53.42), $\text{H}^{2\text{eq}}-\text{C}^{2\text{eq}}$ (2.93, 53.41), $\text{H}^{7\text{ax}}-\text{C}^{7\text{ax}}$ (3.12, 43.92), $\text{H}^{7\text{eq}}-\text{C}^{7\text{eq}}$ (3.52, 43.85), H^6-C^6 (3.18, 63.69), $\text{H}^{14}-\text{C}^{14}$ (7.32, 124.61), $\text{H}^{15}-\text{C}^{15}$ (7.67, 135.42), $\text{H}^{11,13}-\text{C}^{11,13}$ (8.46, 149.42).

Наблюдаемые корреляции гетероядерной природы в молекуле N-ацетонитриланабазина представлены на рисунке 8.

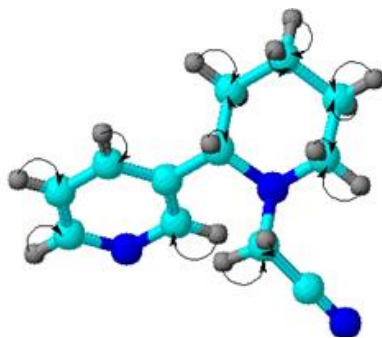


Рисунок 8 – Схема корреляций НМQC (^1H - ^{13}C) в молекуле N-ацетонитриланабазина

Химические сдвиги ЯМР N-ацетонитриланабазина в дейтерированном ДМСО, используемые для сравнительного анализа с исходным анабазином, представлены в середине таблицы 2.

Замена в молекуле анабазина атома водорода при атоме азота на ацетонитрильную группу привело в большей части к экранированию протонов пиперидинового цикла анабазина. Наибольшему дезэкранированию подверглись находящиеся поблизости с введенной ацетонитрильной группой протоны Н-6 ($\Delta\delta(\delta - \delta_0) = -0.35$ м.д.) и Н-2eq пиперидинового ядра ($\Delta\delta(\delta - \delta_0) = -0.26$ м.д.). Чуть меньшее по силе дезэкранирование претерпевают протоны пиперидинового цикла Н-4ax, Н-3eq и протон пиридинового цикла Н-12. Уменьшение величины химического сдвига протонов составляет 0.07-0.10 м.д. Наименьшее дезэкранирование протонов в рассматриваемом соединении происходит у атомов Н-2eq пиперидинового цикла и Н-8 пиридинового ядра. Уменьшение величины химического сдвига протонов составляет 0.01-0.03 м.д. В молекуле N-ацетонитриланабазина ацетонитрильная группа из-за электронодонорного эффекта дезэкранирует находящиеся поблизости с ним протоны Н-2ax и Н-6 пиперидинового цикла.

Представленные в таблице 2 данные показывают также на экранирующее влияние ацетонитрильной группы на анабазиновый фрагмент молекулы в более отдаленных от нее атомах пиперидинового цикла Н-5ax, Н-5eq и Н-4eq. Увеличение величины химического сдвига ^1H ЯМР данных атомов составляет 0.17-0.37 м.д. Наблюдается также экранирующий эффект в протонах Н-10 и Н-11 пиридинового цикла. Химический сдвиг в этих атомах увеличивается на 0.09 м.д. в сравнении с незамещенным анабазиновым фрагментом.

Сравнение представленных данных по химическим сдвигам при экранировании и дезэкранировании пиридинового и пиперидинового циклов показывает, что ароматический цикл более устойчив и наименее подвержен электронному влиянию акрилонитрильной группировки.

Мультиплетность исследуемых протонных сигналов в анабазине и N-ацетонитриланабазине в основном сохранилась. Приблизительно одинаковые значения имеют константы спин-спинового взаимодействия через три связи и через четыре связи. Наблюдающиеся в анабазине дискретные дублеты дублетов (Н-6, Н-10, Н-11) переходят в мультиплете в его N-ацетонитрильном производном. Также дублет при 8.50 м.д. протона Н-8 перешел в синглетный сигнал при 8.47 м.д.

Учитывая, что чувствительность углеродных сигналов ЯМР в сто раз менее чувствительности протонных спектров, больших изменений в их сигналах найдено не было.

Таблица 2 – Химические сдвиги ядер ^1H и ^{13}C ЯМР спектров анабазина и N-ацетонитриланабазина

№ атома	Группа	Химические сдвиги анабазина 1 (δ_0), м.д.		Химические сдвиги N-ацетонитрил-анабазина 3 (δ), м.д.		$\Delta\delta(\delta - \delta_0)$, м.д.	
		CH_x	$\delta(^1\text{H})$	$\delta(^{13}\text{C})$	$\delta(^1\text{H})$	$\delta(^{13}\text{C})$	$\Delta\delta(^1\text{H})$
1	NH		3.15 уш.с.	-	-	-	-
2ax	-CH ₂ -		2.61 дт, ^3J 11.7, ^4J 2.7 Гц	47.20	2.35 дт, ^3J 11.9, ^4J 2.7 Гц	53.42	-0.26 6.22
2eq			2.99-3.02 м		3.00 м.д. с ^3J 11.4 Гц		-0.01
3ax	-CH ₂ -		1.36-1.43 м	25.51	1.44-1.50 м	25.69	0.07 0.18
3eq			1.75-1.77 м		1.64-1.73 м		-0.07
4ax	-CH ₂ -		1.36-1.43 м	25.97	1.26-1.36 м	24.52	-0.09 -1.45
4eq			1.50-1.53 м		1.64-1.73 м		0.17
5ax	-CH ₂ -		1.29-1.35 м	35.38	1.64-1.74 м	35.68	0.37 0.30
5eq			1.64-1.67 м		1.44-1.50 м		0.18
6	>CH-		3.53 дд, ^3J 11.0, ^4J 2.4 Гц.	59.37	3.17-3.19 м	63.71	-0.35 4.34
7 (10)	>C=		-	141.60	-	138.29	- -3.31
8 (11)	-CH=		8.50 д, ^4J 4.0 Гц	148.51	8.47 с	149.66	-0.03 1.15
10 (13)	-CH=		8.38 дд, ^3J 4.8, ^4J 4.0 Гц	148.51	8.47-8.48 м	149.27	0.09 0.76
11 (14)	-CH=		7.26 дд, ^3J 7.8, ^4J 5.0 Гц	123.66	7.34-7.37 м	124.88	0.09 1.22
12 (15)	-CH=		7.68 дт, ^3J 8.0, ^4J 2.0 Гц	134.52	7.67 дт, ^3J 7.8, ^4J 1.8 Гц	135.36	-0.10 0.84
7ax	-CH ₂ -		-	-	3.14 д, ^2J 17.8 Гц	43.78	
7eq					3.55 д, ^2J 17.8 Гц		
8	-C \equiv		-	-	-	116.65	

Таблица 3 – Химические сдвиги ядер ^1H и ^{13}C ЯМР спектров анабазина и N-циннамоиланабазина

№ атома	Группа	Химические сдвиги анабазина 1 (δ_0), м.д.		Химические сдвиги N-циннамоил-анабазина 4 (δ), м.д.		$\Delta\delta(\delta - \delta_0)$, м.д.	
		CH_x	$\delta(^1\text{H})$	$\delta(^{13}\text{C})$	$\delta(^1\text{H})$	$\delta(^{13}\text{C})$	$\Delta\delta(^1\text{H})$
1	NH		3.15 уш.с.	-	-	-	-
2ax (9)	-CH ₂ -		2.61 дт, ^3J 11.7, ^4J 2.7 Гц	47.20	3.41-3.43 м	42.23	0.81 -4.97
2eq (9)			2.99-3.02 м		4.22 уш. с		1.22
3ax (10)	-CH ₂ -		1.36-1.43 м	25.51	1.55-1.57 м	26.19	0.17 0.68
3eq (10)			1.75-1.77 м		1.79 уш. с		0.03
4ax (11)	-CH ₂ -		1.36-1.43 м	25.97	1.22-1.28 м	19.72	-0.14 -6.25
4eq (11)			1.50-1.53 м		1.55-1.57 м		0.05
5ax (12)	-CH ₂ -		1.29-1.35 м	35.38	2.32-2.36 м	27.61	0.02 -7.77
5eq (12)			1.64-1.67 м		2.87 уш. с		1.22
6 (7)	>CH-		3.53 дд, ^3J 11.0, ^4J 2.4 Гц.	59.37	5.87 уш. с	49.84	2.34 -9.53
7 (3)	>C=		-	141.60	-	128.58	-13.02
8 (2)	-CH=		8.50 д, ^4J 4.0 Гц	148.51	8.44-8.47 м	148.65	-0.08 0.14
10 (6)	-CH=		8.38 дд, ^3J 4.8, ^4J 4.0 Гц	148.51	8.44-8.47 м	148.28	0.08 -0.23
11 (5)	-CH=		7.26 дд, ^3J 7.8, ^4J 5.0 Гц	123.66	7.30-7.34 м	124.13	0.06 0.47
12 (4)	-CH=		7.68 дт, ^3J 8.0, ^4J 2.0 Гц	134.52	7.56-7.69 м	134.92	-0.06 0.40
13	>C=O				-	166.27	
15	-CH=				7.56-7.69 м	118.83	
16	-CH=				7.56-7.69 м	142.68	
17	>C=				-	135.68	
18	-CH=				7.30-7.34 м	130.05	
19	-CH=				7.30-7.34 м	129.23	
20	-CH=				7.56-7.69 м	128.80	
21	-CH=				7.30-7.34 м	129.23	
22	-CH=				7.30-7.34 м	130.05	

В спектре ЯМР ^1H N-циннамоиланабазина **4** сигналы пиперидинового цикла проявились мультиплетами при 1.22-1.28 (H-11ax), 1.55-1.57 (H-11eq, 10ax), 2.32-2.36 (H-12ax) и 3.41-3.43 (H-9ax) м.д. и уширенными синглетами при 1.79 (H-10eq), 2.87 (H-12eq), 4.22 (H-9eq) и 5.87 (H-7) м.д. Наблюдаемые корреляции НМРС (^1H - ^{13}C) в N-циннамоиланабазина представлены на рисунке 9.

Непредельные алифатические протоны H-15 и H-16 резонировали мультиплетом в области 7.56-7.69 м.д.

Замена в молекуле анабазина атома водорода при атоме азота на циннамоильную группу привело в большей степени к дезэкранированию протонов анабазинового остова. Причем в большей степени дезэкранированию подверглись протоны пиперидинового цикла анабазиновой молекулы, как и в случае N-ацетонитриланабазина.

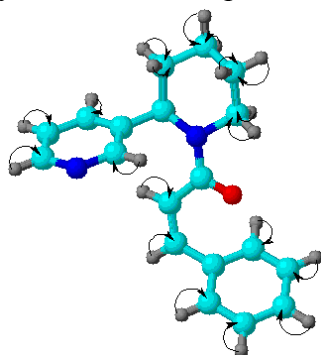


Рисунок 9 – Схема корреляций НМРС (^1H - ^{13}C) в N-циннамоиланабазина

Увеличение химического сдвига пиперидиновых протонов H-2eq и H-7 в сравнении с исходным анабазином достигало 1.22 и 2.34 м.д. соответственно. Немного меньшее дезэкранирование произошло на пиперидиновом протоне H-2ax. Увеличение химического сдвига на данном атоме составило 0.17 м.д. Незначительное экранирование пиперидиновых протонов наблюдалось на самом отдаленном протоне H-11ax. Химический сдвиг на данном атоме уменьшился на 0.14 м.д. в сравнении с исходной незамещенной молекулой анабазина. Как видно из таблицы 3, в пиридиновом фрагменте N-циннамоиланабазине и оставшихся пиперидиновых протонах изменение химического сдвига на протонах незначительно. Полученные результаты свидетельствуют, что сочетание ненасыщенных этиленовых протонов, карбонильной группы и ароматического кольца в циннамоильной группе оказывают общий положительный индуктивный эффект.

Мультиплетность исследуемых протонных сигналов анабазина в N-циннамоиланабазине изменялась от более упорядоченных дублетов дублета и дублета триплетов в менее упорядоченные мультиплетные сигналы. Увеличение размера исследуемой молекулы – N-циннамоиланабазина – в сравнении с исходным соединением – анабазином – приводит к уменьшению чувствительности спектрометра и меньшему разрешению исследуемых сигналов.

Экспериментальная часть

Спектры ЯМР ^1H и ^{13}C соединений **2-6** снимали на спектрометре JNM-ECA Jeol 400 (частота 399.78 и 100.53 МГц соответственно) с использованием растворителя ДМСО- d_6 . Химические сдвиги измерены относительно сигналов остаточных протонов или атомов углерода ДМСО- d_6 .

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки РК (грант по ПЦФ № BR10965230)

Литература:

1. Chizhik V.I., Chernyshev Y.S., Donets A.V., Frolov V.V., Komolkin A.V., Shelyapina M. G. *Magnetic Resonance and Its Applications*. – Heidelberg: Springer International Publishing, 2014. – 782 p.
2. Sanders J. K. M., Hunter B. K. *Modern NMR Spectroscopy. A Guide for Chemists*. – Oxford: Oxford University Press, 1993. – 128 p.
3. Kemelbekov U., Saipov A., Abdildanova A., Ospanov I., Luo Y., Guskov A., Saenger W., Imachova Sh., Nasyrova S., Pichkhadze G. Structure and pharmacological studies of the anaesthetic 1-(3-n-butoxypropyl)-4-benzoyloxypiperidin hydrochloride and its complex with β -cyclodextrin in solution. *NMR and IR-spectroscopy data // J. Incl. Phenom. Macrocycl. Chem.* – 2013. – Vol. 77, Issue 1–4. – P. 249–257.
4. Kaldybekova G.M., Kemel'bekov U.S., Abdildanova A.A., Praliev K.D., Volynkin V.A., Nasyrova S.R., Imashova Sh.O., Pichkhadze G.M. Preparation of an inclusion complex of 1-(3-n-butoxypropyl)-4-vinylacetylen-4-benzoiloxypiperidine with β -cyclodextrin and its local anesthetic activity // *Pharmaceutical Chemistry Journal*. – 2014. – Vol. 48, N 3. – P. 196–200.
5. Butkus E.P., Martins J.C. ^1H NMR study of inclusion of substituted bicyclo[3.3.1]nonanes in α - and β -cyclodextrins // *Russian Chemical Bulletin*. – 1995. – Vol. 44, N 12. – P. 2420–2422.
6. Seilkhanov T.M., Nazarenko L.A., Poplavskii N.N., Seilkhanov O.T., Iskakova T.K., Praliev K.D., Abzhapparov A.A., Zharkinbekov T.N. NMR Study of Supramolecular Inclusion Complexes of 7-[2-(Morpholin-4-yl)ethyl]-3-(2-ethoxyethyl)-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane with Cyclodextrins // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2015. – Vol. 85, N 5. – P. 1098–1102.
7. Нуркенов О.А., Фазылов С.Д., Кулаков И.В., Мусина Л.А. Алкалоид анабазин и его производные. – Караганда: Гластр, 2010. – 224 с.
8. Nurkenov O.A., Satpaeva Zh. B., Fazylov S.D., Seilkhanov T.M., Turdybekov K.M., Turdybekov D.M., Akhmetova S.B., Makhmutova A.S., Gazaliev A.M. Synthesis of thiourea derivatives of the alkaloids anabesine, cytisine and d-pseudoephedrine. Crystal structure of N-ethyl-N-anabasinocarbothioamide // *Chemistry of Natural Compounds*. – 2016. - Vol. 52, issue 2. – P. 276-279.
9. Nurkenov O.A., Nurmaganbetov Z.S., Seilkhanov T.M., Fazylov S.D., Manasheva V.M., Zhasymbekova A.R., Serikbolov A.S. Synthesis and structured N-acyl and thiourea derivatives citizine and anabazine // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series Chemistry and Technology*. – 2020. – Vol. 1, N 439. – P. 37 – 461. – P. 37–46.
10. Nurkenov O.A., Nurmaganbetov Zh.S., Seilkhanov T.M., Fazylov S.D., Satpayeva Zh.B., Turdybekov K.M., Talipov S.A., Seydakhmetova R.B. Synthesis, Structure, and Biological Activity of Cinnamoyl-Containing Cytisine and Anabesine Alkaloids Derivatives // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2019. – Vol. 89, Issue 10. – P. 2044–2051.
11. Kabieva S.K., Nurkenov O.A., Seilkhanov T.M., Bakibaev A.A., Gazaliev A.M., Takibaeva A.T., Voronov O.A., Plotnikov E.V. Synthesis, Structure, and Antioxidant Activity of Anabasinium O,O-Dimethylthiophosphate // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2016. – Vol. 86, Issue 7. – P. 1765–1768.

References:

1. Chizhik V.I., Chernyshev Y.S., Donets A.V., Frolov V.V., Komolkin A.V., Shelyapina M. G. *Magnetic Resonance and Its Applications*. – Heidelberg: Springer International Publishing, 2014. – 782 p.
2. Sanders J. K. M., Hunter B. K. *Modern NMR Spectroscopy. A Guide for Chemists*. – Oxford: Oxford University Press, 1993. – 128 p.
3. Kemelbekov U., Saipov A., Abdildanova A., Ospanov I., Luo Y., Guskov A., Saenger W., Imachova Sh., Nasyrova S., Pichkhadze G. Structure and pharmacological studies of the anaesthetic 1-(3-n-butoxypropyl)-4-benzoyloxypiperidin hydrochloride and its complex with β -cyclodextrin in solution. *NMR and IR-spectroscopy data // J. Incl. Phenom. Macrocycl. Chem.* – 2013. – Vol. 77, Issue 1–4. – P. 249–257.

4. Kaldybekova G.M., Kemel'bekov U.S., Abdildanova A.A., Praliev K.D., Volynkin V.A., Nasyrova S.R., Imashova Sh.O., Pichkhadze G.M. Preparation of an inclusion complex of 1-(3-n-butoxypropyl)-4-vinylacetylen-4-benzoiloxypiperidine with β -cyclodextrin and its local anesthetic activity // *Pharmaceutical Chemistry Journal*. – 2014. – Vol. 48, N 3. – P. 196–200.
5. Butkus E.P., Martins J.C. ¹H NMR study of inclusion of substituted bicyclo[3.3.1]nonanes in α - and β -cyclodextrins // *Russian Chemical Bulletin*. – 1995. – Vol. 44, N 12. – P. 2420–2422.
6. Seilkhanov T.M., Nazarenko L.A., Poplavskii N.N., Seilkhanov O.T., Iskakova T.K., Praliev K.D., Abzhapparov A.A., Zharkinbekov T.N. NMR Study of Supramolecular Inclusion Complexes of 7-[2-(Morpholin-4-yl)ethyl]-3-(2-ethoxyethyl)-3,7-diazabicyclo[3.3.1]nonane with Cyclodextrins // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2015. – Vol. 85, N 5. – P. 1098–1102.
7. Nurkenov O.A., Fazylov S.D., Kulakov I.V., Musina L.A. Alkaloid anabazin i ego proizvodnye. – Karaganda: Glastr, 2010. – 224 p.
8. Nurkenov O.A., Satpaeva Zh. B., Fazylov S.D., Seilkhanov T.M., Turdybekov K.M., Turdybekov D.M., Akhmetova S.B., Makhmutova A.S., Gazaliev A.M. Synthesis of thiourea derivatives of the alkaloids anabasine, cytisine and d-pseudoephedrine. Crystal structure of N-ethyl-N-anabasinocarbothioamide // *Chemistry of Natural Compounds*. – 2016. - Vol. 52, issue 2. – P. 276-279.
9. Nurkenov O.A., Nurmaganbetov Z.S., Seilkhanov T.M., Fazylov S.D., Manasheva V.M., Zhasymbekova A.R., Serikbolov A.S. Synthesis and structured N-acyl and thiourea derivatives citizine and anabazine // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series Chemistry and Technology*. – 2020. – Vol. 1, N 439. – P. 37 – 461. – P. 37–46.
10. Nurkenov O.A., Nurmaganbetov Zh.S., Seilkhanov T.M., Fazylov S.D., Satpayeva Zh.B., Turdybekov K.M., Talipov S.A., Seydakhmetova R.B. Synthesis, Structure, and Biological Activity of Cinnamoyl-Containing Cytisine and Anabasine Alkaloids Derivatives // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2019. – Vol. 89, Issue 10. – P. 2044–2051.
11. Kabieva S.K., Nurkenov O.A., Seilkhanov T.M., Bakibaev A.A., Gazaliev A.M., Takibaeva A.T., Voronov O.A., Plotnikov E.V. Synthesis, Structure, and Antioxidant Activity of Anabasinium O,O-Dimethylthiophosphate // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2016. – Vol. 86, Issue 7. – P. 1765–1768.

Поступила 18 декабря 2021 г.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Бакиров Ахат – докторант PhD, старший преподаватель Алматинского университета энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева. Главный системный инженер ДБ АО «Сбербанк». Orcid ID 0000-0002-2563-307X.
2. Витулёва Е.С. – докторант PhD, старший преподаватель кафедры телекоммуникационных сетей и систем Института космической инженерии и телекоммуникаций Алматинского университета энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева. Orcid ID 0000-0002-6075-4870.
3. Зайытхан М. – магистрант педагогического института Кокшетауского университета им. Ш. Уалиханова. Orcid ID 0000-0003-1608-8724.
4. Коккоз М.М. – кандидат педагогических наук, доцент, заведующая кафедрой информационных технологий и безопасности НАО Карагандинский технический университет. Orcid ID 0000-0002-3582-4785.
5. Коньшин С.В. – кандидат технических наук, профессор, проректор по академической деятельности Алматинского университета энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева. Orcid ID 0000-0003-0951-5468.
6. Лим С.С. – магистрант кафедры информационных технологий и безопасности НАО Карагандинский технический университет. Orcid ID 0000-0002-9304-0487.
7. Махметова Г.М. – магистрант педагогического института Кокшетауского университета им. Ш. Уалиханова. Orcid ID 0000-0003-3824-8629.
8. Мун А.С. – старший инженер кафедры прикладной математики Казахского Национального университета им. аль-Фараби. Orcid ID 0000-0002-2176-9906.

9. Мун Г.А. – доктор химических наук, профессор, академик Национальной инженерной академии РК, заведующий кафедрой химии и технологии органических веществ, природных соединений и полимеров факультета химии и химической технологии Казахского национального университета им. аль-Фараби. Orcid ID 0000-0001-5522-1255.
10. Нуркенов О.А. доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией синтеза биологически активных соединений Института органического синтеза и углехимии Республики Казахстан, Караганда. 0000-0003-1878-2787.
11. Нурмаганбетов Ж.С. кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Институт органического синтеза и углехимии Республики Казахстан, Караганда. Orcid ID 0000-0002-0978-5663.
12. Сейлханов О.Т. магистр естествознания, старший научный сотрудник лаборатории ЯМР-спектроскопии Кокшетауского университета им. Ш. Уалиханова. Orcid ID 0000-0002-2322-8863.
13. Сейлханов Т.М. – кандидат химических наук, профессор, руководитель лаборатории ЯМР-спектроскопии Кокшетауского университета им. Ш. Уалиханова. Orcid ID 0000-0003-0079-4755.
14. Сулейменов И.Э. – доктор химических наук, кандидат физико-математических наук, профессор, академик Национальной инженерной академии РК, профессор Института медийных технологий Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация. Orcid ID 0000-0002-7274-029X.

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА

БАКИРОВ А.С.

Алгоритмизация построения обобщенных функций Радемахера в полях Галуа 4

ВИТУЛЁВА Е.С., КОНЬШИН С.В., МУН Г.А.

Системы противодействия массовым беспорядкам на основе боевых нейронных сетей ... 11

Лим С.С., Коккоз М.М.

Проектирование системы безопасности умного дома с использованием распознавания объектов с ИК-датчика 32

Матрасулова Д.К.

Некоторые соотношения для биномиальных коэффициентов в полях Галуа 43

МУН А.С.

Направления решений великой теоремы Ферма 49

СУЛЕЙМЕНОВ И.Э., ВИТУЛЁВА Е.С.

Системы счисления с гибридным основанием: новые перспективы использования многозначной логики 57

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

СЕЙЛХАНОВ О.Т., ЗАЙЫТХАН М., НУРКЕНОВ О.А., СЕЙЛХАНОВ Т.М.

Исследование методами одно- и двумерной ямр-спектроскопии цитизина и его синтетических производных 71

СЕЙЛХАНОВ О.Т., МАХМЕТОВА Г., НУРМАГАНБЕТОВ Ж.С., НУРКЕНОВ О.А., СЕЙЛХАНОВ Т.М.

Исследование методами одно- и двумерной ЯМР-спектроскопии анабазина и его синтетических производных 87

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 103

CONTENTS

MATHEMATICS AND INFORMATICS

BAKIROV A.S.

Algorithmization for construction of generalized Rademacher functions in Galois fields 4

VITULYOVA YE.S., KONSHIN S.V., MUN G.A.

Crow countering systems based on combat neural networks 11

LIM S.S., KOKKOZ M.M.

Designing a smart home security system using object recognition from an ir sensor 32

MATRASSULOVA D.K.

Some relations for binomial coefficients in Galois fields 43

MUN A.S.

Ways to solve the great Ferme theorem 49

SULEIMENOV I.E., VITULYOVA YE.S.

Numeral systems with a hybrid base: new perspectives on the use of multivalued logic 57

CHEMICAL SCIENCES

SEILKHANOV O.T., ZAIYTKHAN M., NURKENOV O.A., SEILKHANOV T.M.

Study by one- and two-dimensional nmr spectroscopy of cytazine and its synthetic derivatives .. 71

SEILKHANOV O.T., MAKHMETOVA G., NURMAGANBETOV ZH., NURKENOV O.A., SEILKHANOV T.M.

Study by one- and two-dimensional nmr spectroscopy of anabazine and its synthetic derivatives 87

THE INFORMATION ABOUT AUTHORS..... 103

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. Журнал «Известия НТО «Кахак» публикует написанные на русском, казахском, английском и корейском языках оригинальные статьи, обзоры. Также Журнал дает информацию, связанную с деятельностью общества.

2. В оригинальных статьях могут рассматриваться результаты как теоретических, так и прикладных НИР.

3. Авторы, желающие опубликовать обзорную статью, должны предварительно согласовать ее тематику, представив аннотацию на 1–2 стр. В обзорах следует освещать темы, представляющие достаточно общий интерес по выбранной тематике или отражающие какой-либо важный аспект применения в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и т.д. Допускается обобщение результатов многолетних исследований научных коллективов.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц формата А4. Статья должна начинаться с введения. В нем должны быть даны: содержательная постановка рассматриваемого в статье вопроса, краткие сведения по его истории, отличие предлагаемой задачи от уже известных, или преимущество излагаемого метода по сравнению с существующим. Основная часть статьи должна содержать формулировку задачи и предлагаемый метод ее решения, заключительная часть – краткое обсуждение полученных результатов и, если возможно, пример, иллюстрирующий их эффективность и способы применения.

5. Все статьи проходят именное рецензирование не менее, чем двумя независимыми учеными по соответствующей тематике.

6. Решение о публикации статьи принимает редакционная коллегия Журнала.

7. Требования к этике публикаций: Авторы несут ответственность за достоверность и значимость научных результатов, и актуальность научного содержания работ. Рукописи статей, опубликованных ранее, или переданных в другие издания не принимаются.

8. Авторы могут представить электронную версию своей статьи по адресу: **izv.ntokahak@mail.ru**.

Требования к оформлению рукописей

Статьи представляются в электронном виде в текстовом редакторе Word 97, формулы набираются с помощью редактора MS Equation 3.0 (2.0) или ChemDraw.

Шрифт Times New Roman 12 pt. Межстрочный интервал 1,15. Поля: верхнее – 2,0 см, нижнее – 2,0 см, левое – 2,0 см, правое – 2,0 см. Абзац – красная строка – 0,5 см.

Текст статьи должен начинаться с указания:

с левой стороны – индексов МРНТИ и УДК, соответствующих заявленной теме, ниже приводятся:

через строку указывается **заглавие статьи** (прописными буквами, шрифт – полужирный, выравнивание текста по центру, кегль 14 pt). Название должно максимально полно и точно описывать содержание статьи, включать ключевые слова, отражающие направление и/или основной результат исследования, но в то же время быть коротким и ясным и не содержать сокращений.

- фамилии и инициалы авторов (выравнивание текста по центру, шрифт – полужирный, кегль 12 pt),
- название организации и ее местонахождение,
- e-mail авторов (выравнивание текста по центру, курсив, кегль 12 pt),

- резюме (краткое изложение содержания статьи, дающее представление о теме и структуре текста, а также основных результатах, **7–10 предложений**, (выравнивание текста по центру, курсив, кегль 11 pt),
- ключевые слова, обеспечивающие полное раскрытие содержания статьи (**7–10 слов**) выравнивание текста по ширине, курсив, кегль 11 pt),
- текст статьи (выравнивание текста по ширине, курсив, кегль 12 pt),
- список литературы,
- Ф.И.О. авторов, название статьи, резюме, ключевые слова на трех языках (на казахском, английском и русском).

Рисунки должны быть представлены в отдельном файле.

Статья представляется в *doc* или *docx* формате, а также идентичная копия в *pdf* формате, на электронный адрес журнала, в отдельных файлах дублируются рисунки, таблицы, графики, схемы, а также приводятся сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, служебный адрес, место работы, должность, контактные телефоны, e-mail и Orcid ID).

Ссылки на литературные источники в тексте приводятся после цитаты в квадратных скобках. Библиографический список оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание: общие требования и правила составления».

Компьютерный набор и макетирование Ли У.П.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Курмангазы, 40 (Дом Дружбы), офис 34
Тел. 8(727)272-67-74

Подписано в печать 25.12.2021
Печать трафаретная. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная № 1.
Тираж 500 экз.

Отпечатано в «Print Express. Издательство и полиграфия»
Алматы, ул. Байтурсынова, 85
Тел. 8(727)-292-10-95, 8(727)-292-14-28