А.М. Сысков, В.И. Борисов, В.Б. Парашин, В.С. Кубланов

ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ РАДИОЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТКАНЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Аннотация

Представлены результаты исследования информационного множества частотно-временных признаков флуктуаций собственного электромагнитного излучения головного мозга в диапазоне частот от 650 до 850 МГц. Показано, что для периодов флуктуаций 10...20 и 60...70 с существует возможность разделения в признаковом пространстве практически здоровых пациентов и пациентов, страдающих артериальной гипертензией и вегето-сосудистой дистонией.

Функциональное состояние головного мозга является объективным отражением деятельности человека и системной организации регуляторных механизмов, участвующих в его обеспечении [1]. Исключительная роль в этих процессах принадлежит мозговому кровообращению, которое обеспечивает целостность и работоспособность нейронов. Окклюзия сосудов, питающих головной мозг, является начальным звеном в цепочке неблагоприятных изменений, которые приводят к грубым нарушениям метаболизма нейронов, структурно-функциональным изменениям, нередко заканчивающимгибелью нервных клеток. Острая или хроническая ишемия мозговой ткани обусловливает целый каскад патологических реакций, которые в конечном счете приводят к развитию очагового неврологического дефицита, дисциркуляторной энцефалопатии или гибели больного [2].

Известно, что выходные показатели функциональных изменений в тканях мозга относятся к группе интегральных характеристик регуляторных процессов, участвующих в формировании нарушений метаболизма и транспорта жидкости. Диагностика их является актуальной задачей на донозологическом этапе, но может быть также полезной в остром и восстановительном периодах заболеваний, сопровождающихся нарушениями мозгового кровообращения.

Рассмотрим для решения этих задач возможности многоканального СВЧ-радиотермографа, входящего в состав радиофизического комплекса МРТРС [3].

С физической точки зрения это излучение является следствием флуктуаций микрозарядов и микротоков, порождающих случайные электромагнитные поля. В силу отсутствия строго термодинамического равновесия в биологических тканях радиояркостная температура $T_g(t)$ этого излучения является стохастическим процессом и определяется электрофизическими характеристиками биологических тканей, коэффициентом поглощения $\chi(t)$ и термодинамической температурой T(t):

$$T_{s}(t) = \frac{k}{2\pi\lambda^{2}} \chi(t) \cdot T(t), \qquad (1)$$

где k – постоянная Больцмана; λ – длина волны излучения [4].

Физиологическая интерпретация этого излучения является проблемной задачей вследствие неоднозначной зависимости радиояркостной температуры T_g , от электрофизических параметров биологических тканей. Однако в некоторых случаях радиояркостная температура T_g может преимущественно определяться одним из этих параметров.

Так, коэффициент поглощения χ некоторых биологических тканей, морфологическая структура которых практически однородна по всему объему, практически не меняется во времени. В этом случае радиояркостная температура $T_s(t)$ зависит только от изменений термодинамической температуры T(t). Эти особенности излучения позволили создать семейство СВЧ-радиотермометров, обеспечивающих регистрацию изменений термодинамической температуры биологических тканей. Наиболее известным из них является радиотермометр PTM-01-РЭС, который успешно применяется для обнаружения новообразований молочной железы [5].

В [6] показано, что в диапазоне частот менее 0,85 ГГц электромагнитное излучение головного мозга преимущественно отражает изменения диэлектрических свойств биологических тканей, которые зависят от динамики жидкостей в его межклеточных и клеточных структурах. Эти процессы обеспечиваются сложной биофизической системой, в состав которой входят сосудистая система головного мозга и ликвор, омывающий головной и спиной мозг; конечной целью физико-химических процессов данной системы является поддержание целостности и работоспособности нейронов. Деятельность регуляторных контуров управления этими процессами направлена на обеспечение физического гомеостаза, определяемого балансом процесса фильтрации воды из крови в ткань мозга под действием гидростатического давления в артериальном отрезке капилляра и абсорбации ее в венозном отрезке капилляра под действием онкотического давления плазмы крови, и химического гомеостаза внутренней среды мозга [7].

Гипотеза академика Ю.В. Гуляева и Э.Э. Годика о параметрической модуляции собственного электромагнитного излучения человека биохимическими и биофизическими процессами, протекающими в организме [8], стимулировала проведение исследований, в которых показано, что:

- флуктуации излучения с периодом от 10 до 70 с имеют физиологическую природу, не являются прямым отражением колебаний интенсивности мозгового кровоснабжения и преимущественно определяются динамикой межклеточного транспорта жидкости в ткани мозга [9];
- интенсивность флуктуаций преимущественно сосредоточена в области, определяемой периодами от 10 до 50 с, а доминирующими являются флуктуации с периодами от 10 до 20 с [10];
- целесообразно изучать динамику флуктуаций излучения в «частотных окнах», обеспечивающих фильтрацию с периодами, например, 10...25, 25...40, 40...55 и 55...70 с [11].

Но при этом остались недостаточно изученными вопросы идентификации нарушений физиологических механизмов указанных флуктуаций, которые в данный момент времени преимущественно обеспечивают эту модуляцию, т. е. играют ведущую роль в формировании диагностически значимых изменений в тканях головного мозга.

Ниже представлены результаты исследования информационного множества частотно-временных признаков флуктуаций собственного электромагнитного излучения головного мозга для нескольких групп пациентов, нозологический статус которых определен клиническими исследованиями.

Задачей исследования был поиск на множестве частотно-временных признаков флуктуаций собственного электромагнитного излучения головного мозга информационно значимые параметры при выявлении нарушений транспорта жидкости и метаболизма тканей головного мозга.

При решении этой задачи использованы результаты радиотермографирования головного

мозга 70 пациентов, выполненные в 2001-2004 гг. в Республиканском клиническом госпитале ветеранов войн Республики Марий Эл. По данным клинического обследования из них 32 являются практически здоровыми (объекты w1), а у 38 — диагностирован синдром преждевременного старения с выраженными нарушениями сосудистого фактора (объекты w2) [12]. Регистрация данных выполнялась с помощью радиофизического комплекса МРТРС, обеспечивающего измерение излучения в диапазоне частот от 650 до 850 МГц при флуктуационной чувствительности не менее 0,05 К и времени формирования одного независимого отсчета 1 с.

Исследования проводились при двух функциональных состояниях пациентов: функциональный покой в горизонтальном состоянии и пассивная антиортостатическая нагрузка. При антиортостатической нагрузке тела пациента переводили из горизонтального положения в положение с приподнятым на 20° ножным концом. В каждом из функциональных состояний пациенты находились в течение 5 мин.

Информационный анализ проводился в три этапа

На первом из экспериментальных радиотермограмм с помощью модернизированного вейвлета *Morlet* создается информационное множество частотно-временных признаков флуктуаций излучения [12]. Далее формируются обучающие выборки, состоящие из частотно-временных вейвлет-образов спектров радиотермограмм (скейлинг-спектров), соответствующих 10 областям периодов флуктуаций: 0...10, 10...20, 20...30, 30...40, 40...50, 50...60, 60...70, 70...80, 80...90 и 90...100 с. На каждой обучающей выборке решается задача поиска выбросов и восстановления значений в пробелах [13].

На втором этапе на каждой обучающей выборке вычисляется стоимость потерь для каждой из групп пациентов при распознавании состояния

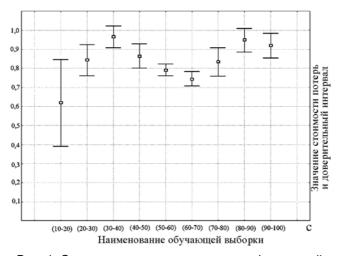


Рис. 1. Значения стоимости потерь для флуктуаций излучения

здоровья пациента с использованием решающей функции метода k-средних. Для вычисления стоимости потерь по формуле (2) вычислялась энтропия N разбиения

$$N = -\sum_{j} P(W_{j}) \sum_{i} P\left(\frac{W_{j}}{S_{i}}\right) \log P\left(\frac{W_{j}}{S_{i}}\right), \qquad (2)$$

где $P(W_j)$ — доля реализаций, которые относятся к состоянию пациентов W_j ; $P(W_j \mid S_i)$ — доля реализаций, принадлежащих к состоянию пациентов W_j , но отнесенных решающей функцией к состоянию пациентов S_i .

Для каждой оценки стоимости потерь производится вычисление доверительного интервала.

На третьем этапе определяются обучающие выборки, на которых стоимость потерь минимальна. На каждой такой выборке проводился факторный анализ с целью выявления информативных областей периодов флуктуаций излучения.

При анализе исследуемого информационного множества обучающих выборок использовался программный пакет Statistica 6.

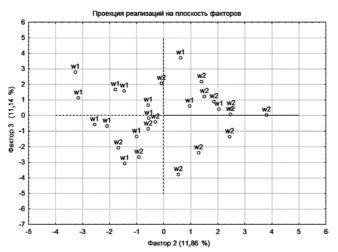


Рис. 2. Проекция реализаций для интервалов периодов 10...20 c

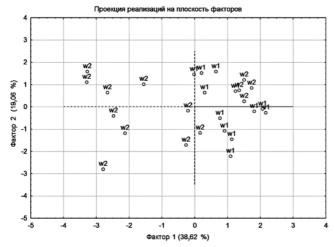


Рис. 3. Проекция реализаций для интервалов периодов 60...70 c

На *рис.* 1 представлены данные о стоимости потерь исследуемого информационного множества, а также обозначены доверительные интервалы для каждого значения стоимости потерь.

Из анализа данных, представленных на *рис. 1*, видно, что для областей периодов флуктуаций 10...20 и 60...70 с стоимости потерь имеют локальные минимумы.

Факторный анализ информационного множества обучающих выборок показал, что для области периодов флуктуаций 10...20 с разделение реализаций в признаковом пространстве происходит в основном в течение 60 с после начала функционального воздействия, а для области периодов флуктуаций 60...70 с – после 180...240 с. Отметим, что компоненты векторов признаков, сформированных при функциональном покое пациентов, вносят меньший вклад в диагностически значимое разделение реализаций.

На *рис.* 2 и 3 представлены графические иллюстрации проекций соответствующих образов реализаций на главные факторы.

Из рис. 2 и 3 видно, что для интервала периодов флуктуаций излучения 60...70 с фактор, разделяющий образы, выражен в большей степени, чем для интервала периодов флуктуаций 10...20 с. Эта особенность объясняется более узким доверительным интервалом стоимости потерь для этого периода флуктуаций (см. рис. 1).

Однако отметим, что несмотря на хорошее разделение образов для флуктуаций излучения с периодами 60...70 с, здесь наблюдается наложение образов разных групп: до 50 % образов объектов w2 размещается в области компактно расположенных образов объектов w1. Для флуктуаций излучения с периодами 10...20 с такое наложение выражено в значительно меньшей степени.

Так как в обучающей выборке присутствовали две группы клинически диагностированных пациентов, частотно-временные образы информационного множества можно идентифицировать следующим образом:

- флуктуации излучения с периодами в диапазоне 10...20 с являются диагностически значимой информацией для разделения практически здоровых пациентов и пациентов с синдромом преждевременного старения (по всей видимости, здесь главным фактором является состояние сосудистой системы);
- флуктуации излучения с периодами в диапазоне 60...70 с отражают диагностически значимую информацию только для части пациентов с сосудистыми нарушениями (примерно 50 % распознаются корректно), а также являются следствием термодинамических процессов в тканях мозга, формируемых метаболическими изменениями в них.

Полученные в работе выводы совпадают с результатами исследований теоретических и экспериментальных исследований, приведенными в [6]. Флуктуации собственного электромагнитного излучения головного мозга в полосе частот от 650 до

850 МГц являются объективным отражением не только изменений электрофизических характеристик в тканях мозга, но и физиологических изменений в них. Спектр этих флуктуаций в диапазоне частот от 0,15 до 0,025 Гц преимущественно отражает изменения диэлектрической проницаемости в тканях на глубине более 10 мм и является следствием гуморальных процессов. В области частот менее 0,025 Гц интенсивность флуктуаций ЭМИ головного мозга определяется термодинамическими изменениями в его тканях, которые являются результатом метаболических процессов. Эти выводы подтверждают правомерность гипотезы о механизме транспорта жидкости в межклеточные и внутриклеточные пространства нервной ткани [9].

Таким образом, предложенная в работе методика распознавания информационных паттернов в скейлинг-спектрах флуктуаций собственного электромагнитного излучения головного мозга позволяет разделять радиотермограммы в соответствии с состоянием здоровья пациентов. Показано, что разделение скейлинг-спектров излучения практически здоровых пациентов и пациентов, страдающих синдромом преждевременного старения с выраженными нарушениями сосудистого фактора, при использовании в качестве функционально-нагрузочной пробы антиортостатической нагрузки необходимо выполнять в областях периодов флуктуаций излучения 10...20 и 60...70 с.

При других нозологических случаях и функционально-нагрузочных пробах области периодов флуктуаций излучения, при которых происходит разделение информационного множества частотновременных признаков флуктуаций излучения в соответствии с состоянием здоровья пациентов, могут отличаться от полученных в настоящей работе.

Список литературы:

- 1. *Бехтерева Н.П.* Здоровый и больной мозг человека. – Л.: Наука, 1980. 208 с.
- 2. $A\partial o$ А.Д. Патологическая физиология. М.: Триада-X, 2000. 607 с.
- Кубланов В.С. Радиофизический комплекс для функциональных исследований головного мозга // Медицинская техника. 2008. № 4. С. 40-46.
- 4. *Рытов С.М.* Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука. 1966. 404 с.
- Вайсблат А.В. Медицинский радиотермометр РТМ-01-РЭС // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2001. № 8. С. 3-9.
- 6. Кубланов В.С., Седельников Ю.Е., Азин А.Л., Сысков А.М. Природа флуктуаций собственного электромагнитного излучения головного мозга // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 9. С. 45-54.
- 7. *Москаленко Ю.Е.* Мозговое кровообращение. В кн.: Болезни сердца и сосудов / Под ред. Е.И. Чазова. М.: Медицина, 1992. Т. 1. 496 с.
- Гуляев Ю.В., Годик Э.Э. Физические поля биологических объектов // Вестник АН СССР. Серия физическая. 1983. № 8. С. 118-125.

- 9. Азин А.Л., Кубланов В.С. Метод глубинной СВЧрадиотермографии для изучения патогенеза головной боли. В кн.: Медицинское обслуживание ветеранов войн. — Екатеринбург: Наука, Уральское отделение, 1995. С. 27-36.
- 10. *Кубланов В.С., Гасилов В.Л., Казаков Я.Е.* Особенности частотно-временных распределений интенсивности флуктуаций электромагнитного излучения глубинных структур головного мозга // Биомедицинская радиоэлектроника. 1999. № 5. С. 13-25.
- 11. Кубланов В.С., Гасилов В.Л. Применение методологии вейвлет-анализа при функциональных исследованиях головного мозга // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2001. № 11. С. 14-20.
- 12. *Хабибрахманова Л.Х*. Цереброваскулярные показатели и уровень гидратации головного мозга при ускоренном старении организма / Автореф. дис... канд. мед. наук. СПб, 2004. 25 с.
- 13. Кубланов В.С., Костоусов В.Б., Попов А.А., Азин А.Л. Применение методологии вейвлет-анализа при исследовании функционального состояния головного мозга / Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. М.: Инсвязьиздат, 2005. Вып. 7. С. 489-494.
- 14. *Загоруйко Н.Г.* Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999. 261 с.

Алексей Мстиславович Сысков, начальник управления информатизации, Василий Ильич Борисов, аспирант,

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург,

Владимир Борисович Парашин, д-р техн. наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва,

Владимир Семенович Кубланов, д-р техн. наук, профессор, руководитель Научно-исследовательского медико-биологического инженерного центра высоких технологий,

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, e-mail: a.m.syskov@gmail.com