
**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ ДЛЯ БИОЛОГИИ
И МЕДИЦИНЫ**

УДК 537.623.3-022.532: 543.429.23

© А. И. Жерновой, 2019

**БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ
И ЛОКАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ
ВНУТРИ ЖИВОГО ОРГАНИЗМА (краткое сообщение)**

В работе предлагается способ измерения локальной концентрации N и локальной температуры T магнитных наночастиц внутри живого организма при помощи магнитно-резонансного томографа, работающего при двух индукциях магнитного поля $B_1 > 3kT$ и $B_2 < kT$: $N = M_1 / P$, $T = PB_2 / (k \ln(M_1 / M_2))$ (k — постоянная Больцмана; P — магнитный момент наночастицы; M_2, M_1 — намагниченности, измеренные при индукциях B_2 и B_1).

Кл. сл.: локальная концентрация наночастиц, локальная температура наночастиц, рентгеновский томограф, магнитно-резонансный томограф

ВВЕДЕНИЕ

Измерение локальной концентрации и температуры магнитных наночастиц внутри организма необходимо для контроля процесса экзотермии, когда наночастицы, имеющие большой магнитный момент P , вводят в организм и, действуя неоднородным магнитным полем, транспортируют по сосудам к ткани-мишени, содержащей раковые клетки. Вблизи ткани-мишени наночастицы, действуя переменным магнитным полем, нагревают до температуры $T_{\text{опт}} \approx 350$ К, при которой раковые клетки погибают, а здоровые клетки не повреждаются. Без контроля перемещения наночастиц по сосудам организма их доставку к ткани-мишени осуществить трудно. Точно так же без контроля локальной температуры наночастиц вблизи ткани-мишени невозможно обеспечить их нагрев до оптимальной температуры $T_{\text{опт}}$. Ниже будут рассмотрены различные возможности осуществления такого контроля.

СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ НАНОЧАСТИЦ**Бесконтактное измерение локальной концентрации наночастиц в организме при помощи компьютерного рентгеновского томографа**

Ферромагнитные наночастицы поглощают рентгеновское излучение, поэтому концентрацию наночастиц в тканях организма можно определять по увеличению коэффициента поглощения рентгеновских лучей в этих тканях, вызванному присутствием наночастиц. Локальный коэффициент поглощения рентгеновских лучей можно измерять методом трехмерной рентгеновской томографии,

сравнивая потемнение аналогичных точек на трехмерных компьютерных рентгенограммах организма, полученных при отсутствии и при наличии магнитных наночастиц.

Бесконтактное измерение локальной концентрации наночастиц в организме при помощи компьютерного магнитно-резонансного томографа

Концентрацию наночастиц в тканях организма можно определять, измеряя локальную намагниченность ткани M , которая равна концентрации наночастиц, умноженной на средний магнитный момент наночастицы P . Для измерения локальных намагниченностей тканей, содержащих магнитные наночастицы, организм нужно поместить в магнитно-резонансный томограф и, регистрируя амплитуды сигнала магнитного резонанса, даваемые протонами тканей в разных точках организма, получить его магнитно-резонансную томограмму. Для определения намагниченности M участка ткани, расположенного в заданной точке организма, можно использовать линейную зависимость от намагниченности сдвига его изображения на томограмме при изменении полярности импульсного градиента томографа [1, 2]. Более конкретно: на томограмме при отсутствии в организме магнитных наночастиц некоторый участок X наблюдается на определенном геометрическом месте, положение которого можно зафиксировать, сравнив с положением на этой же томограмме какой-либо реперной точки организма. Подведение к участку X магнитных наночастиц сдвигает его изображение на томограмме на расстояние Δ в направлении приложенного фазирующего градиента. Присутст-

вие сдвига можно проверить, изменив направление фазирующего градиента на противоположное, при этом изображение на томограмме участка X сдвигается на расстояние 2Δ в противоположном направлении. Полученное при изменении направления фазирующего градиента значение сдвига, равное 2Δ , пропорционально концентрации магнитных наночастиц вблизи выбранного участка X.

Бесконтактное измерение локальной температуры наночастиц в организме при помощи пары (магнитно-резонансный и рентгеновский томографы)

При помощи рентгеновского томографа можно определять только локальную концентрацию наночастиц в организме. Для определения температуры нужно использовать магнитно-резонансный томограф. Для измерения локальной температуры T в выбранной точке организма при помощи магнитно-резонансного томографа используется зависимость от температуры локальной намагниченности введенных в организм магнитных наночастиц. Оценив по сдвигу 2Δ на томограмме локальную намагниченность M , которая по формуле Больцмана зависит от локальной концентрации наночастиц N , магнитного момента наночастиц P и магнитной индукции B : $M = N \cdot P \cdot \exp(P \cdot B / (kT))$, можно найти в этой точке локальную температуру $T = P \cdot B / (k \cdot \ln(M / (N \cdot P)))$. При этом, согласно формуле для температуры, необходимо знать локальную концентрацию наночастиц N , для определения которой можно одновременно с магнитно-резонансным применить рентгеновский томограф, как описано выше.

Измерение локальной концентрации и локальной температуры магнитных наночастиц в организме при помощи магнитно-резонансного томографа

Совместное использование и рентгеновского, и магнитно-резонансного томографов экономически нецелесообразно, поэтому можно предложить способ измерения локальной концентрации и локальной температуры тканей организма при помощи только одного магнитно-резонансного томографа. Для этого можно воспользоваться зависимостью Больцмана для намагниченности магнитных наночастиц $M = N \cdot P \cdot \exp(P \cdot B / (kT))$, в которой при условии $B > 3 kT$ экспонента становится равной единице, в результате чего намагниченность M перестает зависеть от температуры. Поэтому, измерив намагниченность $M_1 = N \cdot P$ при индукции поля $B_1 > 3 kT$, можно независимо от температуры найти локальную концентрацию наночастиц по формуле $N = (M_1 / P)$, а измерив в этой же точке

намагниченность M_2 при индукции поля $B_2 < kT$, можно по формуле $T = P \cdot B_2 / (k \cdot \ln(M_2 / M_1))$ определить в этой точке локальную температуру наночастиц.

ВЫВОДЫ

1. При помощи компьютерного рентгеновского томографа, наблюдая перемещение на томограмме максимума вызванного наночастицами поглощения рентгеновских лучей, можно контролировать доставку наночастиц в нужную точку организма.

2. При помощи компьютерного магнитно-резонансного томографа,

а) наблюдая перемещение на томограмме максимума созданной наночастицами намагниченности, можно контролировать доставку наночастиц в нужную точку организма, если при этом температуры тканей организма постоянны;

б) наблюдая на томограмме распределения локальной намагниченности тканей организма, полученные при индукциях магнитного поля $B > 3 kT$ и $B < kT$,

можно одновременно с локальной концентрацией наночастиц регистрировать локальную температуру тканей, в частности их локальный нагрев или охлаждение.

3. Применение магнитно-резонансного томографа дает возможность, используя его градиентные катушки, создавать неоднородное магнитное поле, осуществляющее транспортировку наночастиц к тканям-мишеням по сосудам организма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неронов Ю.И., Гарайбех З. Ядерный магнитный резонанс в томографии и в спектральных исследованиях тканей головного мозга. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2003. 105 с.
2. Жерновой А.И. Способ измерения температуры внутри вещества или живого организма. Патент на изобретение № 2485461, приоритет 29.12.2011 г., зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20.06.2013 г.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Контакты: Жерновой Александр Иванович,
azhspsb@rambler.ru

Материал поступил в редакцию 25.01.2019

NON-CONTACT MEASUREMENT OF LOCAL CONCENTRATION AND THE LOCAL TEMPERATURE OF MAGNETIC NANOPARTICLES INSIDE OF A LIVING ORGANISM (short message)

A. I. Gernovoy

Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Russia

This paper proposes a method of measuring the local concentration N and the local temperature T of the magnetic nanoparticles inside a living organism by means of magnetic resonance imaging, operating with two inductions of magnetic field $B_1 > 3kT$ and $B_2 < kT$: $N = M_1/P$, $T = P \cdot B_2 / (k \cdot \ln (M_1/M_2))$ (k — Boltzmann constant, P — the magnetic moment of the nanoparticles, M_2, M_1 — the magnetizations measured in the inductions B_2 and B_1). The method is aimed to control the movement of nanoparticles through the body's vessels and their delivery to the target tissue, as well as to control the local temperature of the nanoparticles near the target tissue in order to ensure their heating to the optimum temperature. The use of a magnetic resonance tomograph makes it possible, using its gradient coils, to create a inhomogeneous magnetic field that transports nanoparticles to target tissues throughout body vessels.

Keywords: local concentration of nanoparticles, local temperature of nanoparticles, X-ray tomograph, magnetic resonance tomograph

REFERENCES

1. Neronov Yu.I., Garajbekh Z. *Yadernyj magnitnyj rezonans v tomografii i v spektral'nyh issledovaniyah tkanej golovnogogo mozga* [Nuclear magnetic resonance in tomography and spectral studies of brain tissues]. Moscow, ITMO University, 2003. 105 p. (In Russ.).
2. Zhernovoy A.I. *Sposob izmereniya temperatury vnutri veshchestva ili zhivogo organizma*. Patent na izobretenie № 2485461. [Patent for a method of measuring the temperature inside a substance or a living organism]. Prioritet 29.12.2011. (In Russ.).

Contacts: Zhernovoy Aleksandr Ivanovich,
azhspsb@rambler.ru

Article received by editing board on 25.01.2019