

статочно однородная, без выраженных перепадов. Зернистость структуры обусловлена, вероятно, остаточной шероховатостью поверхности после полировки.

Отличие оптической плотности растворов наночастиц различных металлов, по-видимому, связано с различием их физико-химических свойств, а также коэффициентов отражения металлических образцов при абляции. Выяснено что большой разброс размеров полученных наночастиц меди обуславливает их широкую полосу поглощения и низкую интенсивность спектра.

Литература

1. Иванов, А. М. Получение наночастиц при лазерной абляции металлических поверхностей в жидкости и исследование полученных структур оптическими методами / А. М. Иванов, Н. А. Мыслицкая, М. С. Капелевич // Изв. КГТУ. – 2011. – № 23. – С. 18–24.

2. Ануфрик, С. С. Морфология поверхностных наноструктур цветных металлов, осажденных из растворов аблированных наночастиц / С. С. Ануфрик, С. Н. Анучин, И. Г. Сергиенко // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. – 2021. – Т. 11. – № 1. – С. 59–65.

3. Li, W. R. Antibacterial activity and mechanism of silver nanoparticles on Escherichia coli. / W. R. Li [et al.] // Appl Microbiol Biotechnol. – 2010. – Vol.85, Issue.4. – 1115–22.

А. Н. Шклярва^{1,2}, М. Н. Стародубцева^{1,3}

(¹Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель;

²ГГУ имени Ф. Скорины, Гомель;

³ГГМУ, Гомель)

Науч. рук. **Д. Л. Коваленко**, канд. физ.-мат. наук, доцент

БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОВЕРХНОСТИ КЛЕТОК РАКА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ, ОЦЕНИВАЕМЫЕ ПО ДАННЫМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ В РЕЖИМЕ FORCE VOLUME

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) – это современный метод, который используется для определения механических свойств материалов и биоматериалов. В процессе индентирования поверхности материала наноразмерным остриём зонда АСМ записываются сило-

вые кривые, по которым с использованием ряда теоретических моделей рассчитываются такие механические параметры, как модуль упругости, сила адгезии, деформация, жёсткость и др.

Клеточная механика играет важную роль в функционировании клеток и тканей [1]. При записи силовых кривых в режиме Force Volume регистрируются силы, действующие на острие АСМ зонда, когда он приближается или удаляется от выбранной точки (наноразмерной области) поверхности образца. При достижении силы определённого порогового, заданного заранее пользователем, значения система АСМ записывает данные о положении пьезосканера (высота Z) и АСМ зонд автоматически отводится. В режиме Force Volume запись силовых кривых осуществляется для каждого пикселя будущей карты механических параметров (единичного элемента поверхности образца). На рисунке 1 показаны типичные силовые кривые (кривая подвода отмечена синим цветом, кривая отвода - красным цветом) для живых раковых клеток линии BT-20.

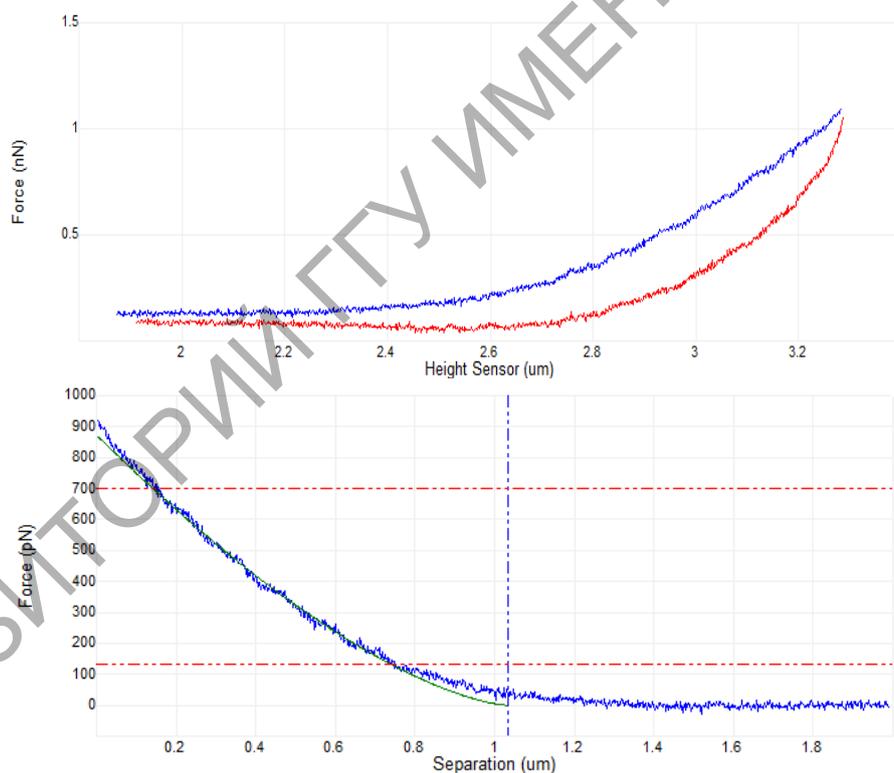


Рисунок 1 – Записанная силовая кривая в режиме Force Volume

В данной работе кривая подвода использовалась для расчёта модуля Юнга поверхности клетки. До того, как наконечник провзаимодействовал с поверхностью клетки, на кривой подвода имеется прак-

тически горизонтальный прямолинейный сегмент (рисунок 1). После того, как наконечник соприкоснулся с поверхностью, кривая изогнулась.

Для обработки данных наноиндентирования для сферических инденторов и оценки модуля Юнга по силовым кривым наиболее часто используется модель Герца, в которой зависимость силы от глубины индентирования (продавливания) образца представлена формулой 1 [2, 3].

$$F = \frac{4}{3} \frac{E}{(1-\nu^2)} \sqrt{R\delta^{3/2}}, \quad (1)$$

где F – сила, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, R – радиус острия зонда, δ – глубина индентирования.

Целью работы являлось определение влияния изменения состояния клеток рака молочной железы, индуцированное тепловым стрессом, на значение модуля Юнга их поверхности, измеренное с использованием режима Force Volume AFM.

Материалы и методы. Клетки рака молочной железы линии BT-20 инкубировали при 37 °С и 5 % CO₂ на среде DMEM-F12 с добавлением 10 % фетальной бычьей сыворотки. Клетки высаживали в чашки Петри с адгезионным покрытием, инкубировали 3 суток при стандартных условиях, затем 30 минут на термошейкере при различных температурах (37°С – 44°С) с дальнейшей инкубацией 1 сутки при стандартных условиях. AFM в режиме Force Volume (FV) проводили с помощью приборного комплекса Bruker BioScope Resolve (Bruker) и прекалиброванного зонда PFQNM-LC-A-CAL ($k=0,088$ и $0,098$ Н/м). Одним из главных параметров записи силовых кривых являются пороговое значение (Trig Threshold) – 1 нН, интервал записи (Ramp Size) – 2 μm , линейность (line) – 20×20, интенсивность нажатия (Ramp Rate) 2 Гц, поступательная скорость (Forward velocity) – 8,14 $\mu\text{m}/\text{с}$.

Результаты и их обсуждение.

В таблице 1 представлены средние значения модуля Юнга, рассчитанные с использованием модели Герца с учётом сил адгезии на основе анализа силовых кривых, записанных в режиме Force Volume для клеточных образцов, подвергшихся тепловому стрессу при различных температурах в интервале 37-48 °С.

С увеличением температуры с 37 до 44 °С имеет место резкое увеличение модуля Юнга поверхности клеток в диапазоне температур 42-44 °С (таблица 1). Максимальную жёсткость имеют клетки после их инкубации при 44 °С. Среднее значение модуля Юнга для поверх-

ности живых ВТ-20 клеток после их инкубации при этой температуре составляет 4,1 кПа, что почти в 2 раза больше, жёсткости контрольного образца клеток, инкубированных при 37 °С (2,1 кПа).

Таблица 1 – Значения модуля упругости

Температура, °С	37	40	42	44
Значение модуля упругости, кПа	2,1	2,4	2,5	4,1
p-value (T37-T40 –**, T37-T42 –**, T37-T44 –****, T40-T42 –ns, T40-T44 –****, T42-T44 –****)	ns-p>0,05; * –p≤0,05; ** –p≤0,01; *** –p≤0,001; **** –p≤0,0001			

В работе впервые измерен модуль Юнга поверхности клеток рака молочной железы ВТ-20 с использованием режима Force Volume АСМ и модели Герца с учётом адгезии. Выявлено резкое увеличение модуля Юнга поверхности раковых клеток после предварительной инкубации клеток при повышенной температуре в диапазоне температур 42–44 °С.

Литература

1. Li, Mi. Effects of temperature and cellular interactions on the mechanics and morphology of human cancer cells investigated by atomic force microscopy / Li Mi and [et.al] // Sci China Life Sci. 2015. – №.58. – С. 889–901.
2. Stylianos-Vasileios, K., The Hertz Model in AFM Nanoindentation Experiments: Applications in Biological Samples and Biomaterials, Micro and Nanosystems, 2018. – №.10. – С. 11–22.
3. Hertz, H. Über die Berührung Fester Elastischer Körper / H. Hertz // J. für die Reine u. Angew. Math. 1881. – № 92. – С. 156–171.