

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЕНОК СЫВОРОТОЧНОГО АЛЬБУМИНА БЫКА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВАКУУМНОГО УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ

В. Х. Нгуен, В. Г. Артюхов, И. А. Колтаков

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 19.02.2018 г.

Аннотация. Исследования процессов фотохимических превращений белков, нуклеиновых кислот и их компонентов под влиянием вакуумного УФ-излучения с длиной волны квантов менее 200 нм, имеют важное значение для выяснения физико-химических основ и закономерностей его биологического действия. Однако, наличие большого числа хромофоров для этого высокоэнергетического участка спектра даже в составе атмосферного воздуха делает невозможным работу с водными растворами белков.

Использование тонких пленок этих биомакромолекул на подложках из MgF_2 делает возможным выполнение работ в условиях, приближенных к высоким околоземным орбитам, где вклад газов атмосферы вносит минимальный вклад в изменение интенсивности светового потока источников света.

В ходе выполнения исследования было установлено, что регистрация электронных спектров поглощения белков в тонких пленках является довольно сложной процедурой вследствие существенного вклада сил межмолекулярного взаимодействия и геометрии поверхности образца. Выявлены закономерности, позволяющие выделить из электронного спектра поглощения компоненту рассеяния света и особенности поверхности, которые можно использовать для нивелирования этих систематических ошибок при проведении экспериментов.

Предложенные методы обработки данных позволяют получить более корректную информацию об исследуемом белке. Было установлено, что его фотомодификация ВУФ-излучением ($\lambda_{max}=126$ нм) в дозах 9.8 и 49 кДж/м² вызывает повышение интенсивности полосы поглощения в области 190 - 220 нм на 8 и 10 % соответственно. В случае использования дозы облучения 98 кДж/м², было зарегистрировано снижение максимальной интенсивности этой полосы на 20%. Не было выявлено статистически достоверных отличий от контроля в изменении интенсивности поглощения света в области длин волн 270 - 285 нм для всех исследуемых образцов.

Таким образом, можно предположить, что вакуумное УФ-излучение оказывает существенное влияние на структуру молекул сывроточного альбумина. Увеличение оптической плотности в области 190 - 220 нм свидетельствует о том, что под действием квантов используемого нами участка спектра УФ-диапазона электромагнитного излучения происходит серия конформационных перестроек молекулы белка как вследствие прямого действия ВУФ-излучения, так и за счет опосредованного действия свободнорадикальных продуктов, образующихся при фотоионизации кислорода и воды при поглощении ими высокоэнергетических квантов света.

Ключевые слова: вакуумное УФ-излучение, электронные спектры поглощения, сывроточный альбумин.

Исследования процессов фотохимических превращений белков, нуклеиновых кислот и их компонентов под влиянием вакуумного УФ-излучения с длиной волны квантов менее 200 нм, имеют важное значение для выяснения физико-химических основ и закономерностей его биологического действия [1]. Обладая энергией квантов до 125 эВ,

электромагнитное излучение данного участка спектра способно вызывать фотоионизацию и фотодиссоциацию этих биомакромолекул, изучение которых получить информацию о механизмах биологического действия этого ионизирующего излучения в отношении изучаемых систем [2 - 4].

На сегодняшний день большинство работ, посвященных изучению биологического действия

вакуумного УФ-излучения на молекулярном уровне выполнены с использованием в качестве объектов исследования нуклеиновых кислот [5 - 11] и белков [12-17]. В них дается изложение и анализ результатов исследования с обсуждением вопросов взаимосвязи дозозависимых структурных перестроек молекул белка после облучения вакуумным УФ-светом. Однако, очень мало внимания уделяется выделению оновных акцепторов энергии исследуемого излучения и выявлению соотношения вкладов фотохимических процессов, протекающих в биомакромолекулах вследствие фотомодификации исследуемых объектов.

Сложность работы с вакуумным УФ-излучением, от части, связана с наличием большого количества хромофорных групп не только в биомакромолекулах, но и в атмосферном воздухе. Согласно современным данным, способностью активно поглощать кванты света с длиной волны в диапазоне 121 - 190 нм обладают: кислород, азот, диоксид углерода [18, 19]. В связи с чем, проведение исследований в области участка спектра от длины волны Лаймановского предела до 190 нм становится проблематичным в рамках земной атмосферы даже в условиях создания вакуумирования среды и поддержания давления менее $10^{-2} \cdot 10^{-4}$ Па [20].

В связи с этим отдельный интерес представляет не только изучение природы фотохимических превращений биомакромолекул, но и разработка способов повышения точности измерения и представления данных в условиях воздействия вакуумного УФ-излучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования были проведены на тонких пленках бычьего сывороточного альбумина, изготовленных на плоско-параллельных пластинах из MgF_2 диаметром 12.7 мм и толщиной 2 мм (ООО "Электростекло", Россия). Образцы готовили путем нанесения на подложку аликвоты раствора бычьего сывороточного альбумина (Sigma), которую первоначально высушивали в суховоздушном термостате ТС-1/80 (СКТБ, Россия) в течение 1 часа при температуре 37 °С. Затем полученные заготовки подвергали двух-часовому досушиванию в лиофильной сушилке FreeZone (Labconco).

Облучение образцов проводили светом аргонной эксимерной лампы в вакуумной установке VSE-UV (ООО "Вакуумные системы и электроника", Россия) при уровне остаточного давления 2 Па и температуре на поверхности образца 10 °С в

дозах 9.8 ; 49 и 98 кДж/м².

Регистрацию электронных спектров поглощения белка в тонких пленках проводили на спектрофотометре Shimadzu UV-2401PC в диапазоне длин волн 190 - 350 нм.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием модуля статистического анализа Microsoft Office Excel.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На первом этапе исследования нами был произведен подбор оптимальной концентрации белка для приготовления его тонких пленок на поверхности плоско-параллельных пластин из MgF_2 . Поскольку для регистрации электронных спектров поглощения водных растворов белков обычно используется диапазон концентраций от $5 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ моль/л, были приготовлены образцы и измерена величина их оптической плотности в диа-

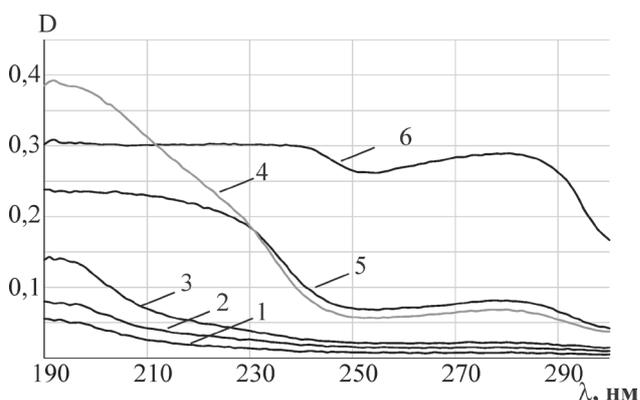


Рис. 1. Электронные спектры поглощения тонких пленок сывороточного альбумина быка, приготовленных из водных растворов с концентрацией: 1 - $1 \cdot 10^{-6}$ моль/л; 2 - $5 \cdot 10^{-6}$ моль/л; 3 - $1 \cdot 10^{-5}$ моль/л; 4 - $5 \cdot 10^{-5}$ моль/л; 5 - $1 \cdot 10^{-4}$ моль/л; 6 - $1 \cdot 10^{-4}$ моль/л.

пазоне длин волн 190 - 300 нм (Рис. 1).

Анализ полученных результатов показал, что регистрация электронных спектров поглощения белков в тонких пленках более сложный процесс, чем в растворах. Зарегистрированное нами смещение максимума полосы поглощения пептидных связей (190 - 220 нм) в область 190 нм и сглаживание полосы ароматических аминокислот (275 - 282 нм) свидетельствовало в пользу того, что в тонких пленках неоднородность поверхности и распределение глобул белка в толще пленки вносит существенный вклад во взаимодействие образца с оптическим излучением.

Для того чтобы доказать эту гипотезу, нами был зарегистрирован профиль поверхности бел-

ковой пленки методом атомно-силовой микроскопии (Рис. 2).

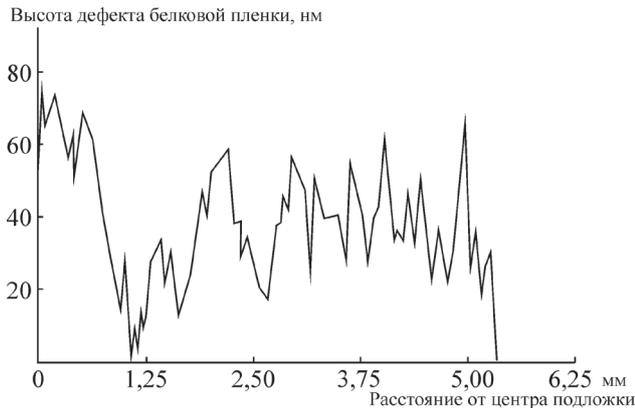


Рис. 2. Профиль наружной поверхности белковой пленки бычьего сывороточного альбумина (в качестве точки отсчета по оси ординат принята минимальная толщина белковой пленки на подложке).

Проведенные измерения показали, что при полном соблюдении технологии приготовления образцов, наблюдается варьирование толщины пленки от 0,128 до 0,196 мкм, а профиль ее поверхности делает возможным ослабление интенсивности падающего на образец луча не только за счет частичного поглощения квантов света, но и за счет рассеяния и множественного отражения.

Таким образом, нами была показана невозможность использования исходных данных, выдаваемых спектрофотометром для оценки роли вакуумного УФ-излучения в изменении спектральных свойств сывороточного альбумина быка.

Далее мы предприняли попытку выделения компоненты рассеяния света из зарегистрированных спектров поглощения. Поскольку для Релеевского рассеяния света эффективное сечение пропорционально частоте света, возведенной в 4 степень, было выдвинуто предположение, что искомая рассеивающая компонента может быть описана уравнением вида:

$$y = a + bx^c, \quad (1)$$

где y - величина оптической плотности образца не связанная с поглощением света и возникающая в спектрофотометре за счет рассеивающей компоненты, a - осевое смещение по оси ординат, b - коэффициент пропорциональности, x - длина волны падающего света, c - показатель степени.

Для расчета рассеивающей компоненты был выбран участок электронного спектра поглощения сывороточного альбумина быка 300 - 350 нм, изменение оптической плотности в области кото-

рого не связано с поглощением энергии квантов света хромофорными группами. Для этого мы рассчитывали значения коэффициентов a , b и c для существующих пар значений x и y , добиваясь максимального соответствия между рассчитанным и экспериментальным графиками по методу наименьших квадратов (Рис. 3).

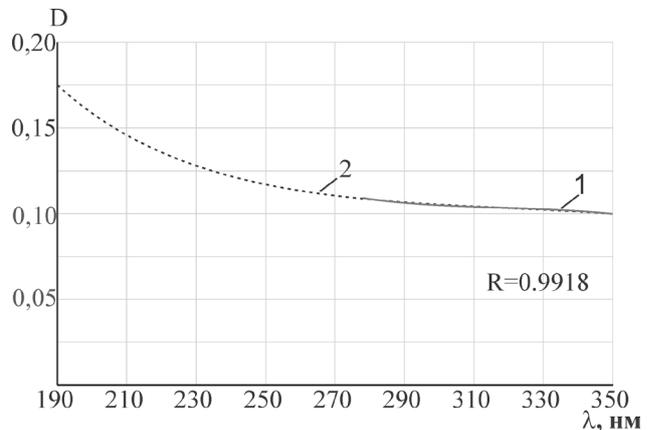


Рис. 3. Экспериментальные (1) и рассчитанные (2) спектры поглощения.

Расчет коэффициентов корреляции между экспериментальными кривыми и расчетным вариантом показал соответствие порядка 0,9897 - 0,9957. Это позволило нам сделать на основании рассчитанной функции аппроксимацию в область 190 - 295 нм.

Далее, рассчитанные нами корректирующие рассеяние света, возникающие вследствие дефектов геометрии поверхности препарата, вычитались из соответствующих им результатов измерения (Рис. 4).

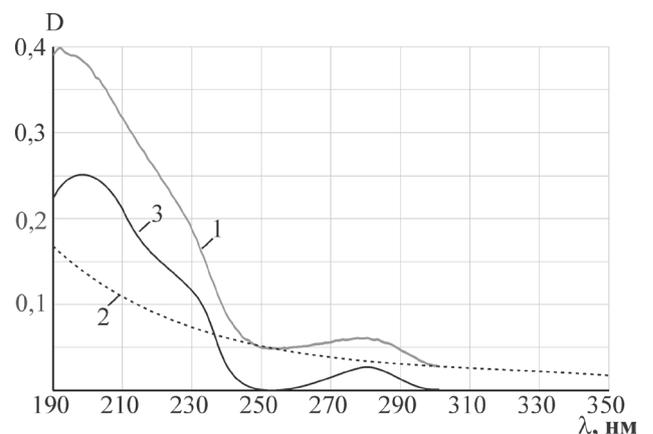


Рис. 4. Электронный спектр поглощения пленки сывороточного альбумина с учетом рассеяния света образцом. Обозначения: 1 - зарегистрированный электронный спектр поглощения; 2 - степенная кривая компенсации рассеяния света; 3 - разностный спектр с учетом вклада рассеивающей компоненты.

Однако, рассеяние света пленкой сывороточного альбумина может быть связано еще и с флуктуацией ее толщины и, как следствие, неоднородностью ее поверхностного слоя. Для этого нами была проведена оценка влияния расположения подложки с пленкой в оптическом тракте спектрофотометра. На держатель и подложку были нанесены нулевые отметки и метки через 90°, 180°, 270° после чего осуществлялась регистрация электронных спектров поглощения при каждом из четырех положений образца, рассчитывались кривые компенсации рассеяния света и строились разностные спектры.

Было установлено, что тестовые кривые, зарегистрированные для различной геометрии положения образца в оптическом тракте спектрофотометра, отличались от среднего значения на 4 - 10,5% (Рис. 5).

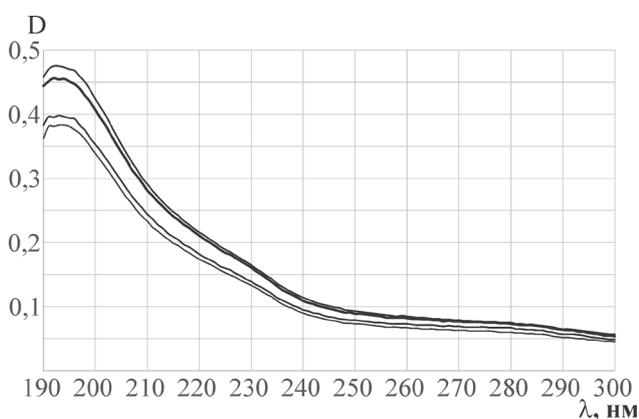


Рис. 5. Электронные спектры поглощения пленки сывороточного альбумина, зарегистрированные под углами 0°, 90°, 180° и 270°.

Рассчитанные коэффициенты корреляции для между 4 кривыми показали соответствие между ними порядка 0,9852 – 0,9906. Для выяснения причин выявленного эффекта кривые были нормированы по длине волны 230 нм, для исключения дефекта варьирования толщины пленки от центра к периферии (Рис. 6).

Таким образом, мы получили возможность измерить систематическую ошибку в зарегистрированных спектрах и исключить ее при дальнейшем анализе результатов.

На следующем этапе работы нами проводилось изучение влияния ВУФ-излучения на спектральные характеристики тонких пленок сывороточного альбумина быка. Облучение образцов проводили на установке VSE-UV (изготовленной по заказу Воронежского государственного университета) светом аргоновой эксимерной лампы с $\lambda_{\text{max}} = 126 \text{ нм}$ в дозах 9.8 ; 49 и 98 кДж/м².

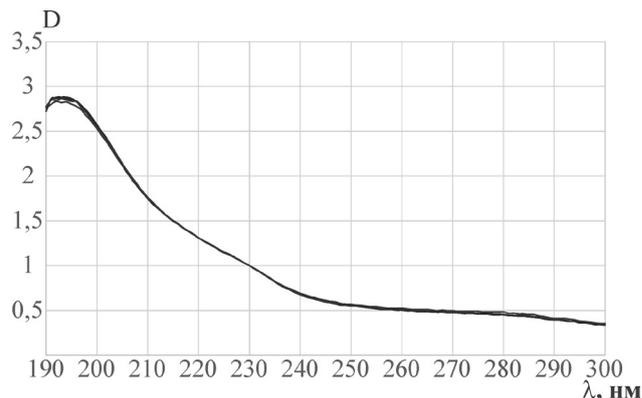


Рис. 6. Нормированные электронные спектры поглощения пленки сывороточного альбумина, зарегистрированные под углами 0°, 90°, 180° и 270°.

Для нивелирования вклада характера поверхности пленки белка, нанесенной на подложку из MgF₂ нами фиксировалось положение образца относительно держателя в кюветном отсеке при регистрации электронных спектров поглощения как до, так и после фотомодификации. Одновременно с этим рассчитывались кривые компенсации рассеяния света тонкими пленками по описанной выше методике и вычитались из зарегистрированных на спектрофотометре данных.

Было установлено, что первые 2 из используемых нами доз вызывают повышение интенсивности полосы поглощения в области 190 - 220 нм на 8 и 10 % соответственно (Рис. 7).

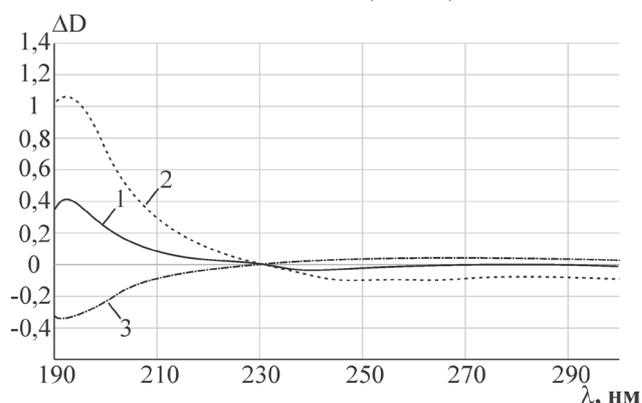


Рис. 7. Разностные электронные спектры поглощения пленок сывороточного альбумина в условиях воздействия ВУФ-излучения в дозах 9.8 (1); 49 (2) и 98 кДж/м² (3).

В случае облучения образцов в максимальной из используемых нами доз, было зарегистрировано снижение интенсивности полосы поглощения 190 - 220 нм. Не было выявлено статистически достоверных отличий от контроля в изменении интенсивности поглощения света в области длин волн 270 - 285 нм для всех исследуемых образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно предположить, что вакуумное УФ-излучение оказывает существенное влияние на структуру молекул сывороточного альбумина. увеличение оптической плотности в области 190 - 220 нм свидетельствует о том, что под действием квантов используемого нами участка спектра УФ-диапазона электромагнитного излучения происходит серия конформационных перестроек молекулы белка, вследствие чего становятся доступными для анализа большее количество хромофорных групп (пептидных связей).

Может быть выделено несколько причин наблюдаемых нами изменений. С одной стороны, нарушение структуры исследуемого транспортного белка может быть связано непосредственно с поглощением энергии квантов ВУФ-излучения. С другой - использование остаточного давления в камере облучателя в пределах 1-2 Па, подразумевает наличие некоторого количества атмосферных газов, и в том числе - кислорода, который обладает способностью ионизироваться и превращаться в атомарный кислород вследствие поглощения энергии квантов с длиной волны около 126 нм.

Вследствие этого, вне зависимости от доминирования одного из путей воздействия ВУФ-излучения на молекулы сывороточного альбумина в тонких пленках, зарегистрированные нами повреждения, вероятно, связаны с протеканием свободно-радикальных процессов.

Результаты исследований частично получены на оборудовании Центра коллективного пользования Воронежского государственного университета. URL: <http://ckp.vsu.ru>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биофизика: учебник для студентов высших учебных заведений / В. Г. Артюхов и др.; под ред. В. Г. Артюхова. Москва: Академический проект; Екатеринбург: Деловая книга, 2013., 294 с.
2. Эффективные источники УФ- и ВУФ-излучения - эксилампы и фотореакторы на их основе / С. М. Авдеев и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60. № 8. С. 31-35.
3. Неважская И. А. Разработка и изготовление источников УФ и ВУФ излучения в гои им. С.И. Вавилова / И.А. Неважская, В.А. Тяпков, Н.В. Шилина, В.Б. Шилев // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 8. С. 108-111.
4. Донин В.И. Мощный высокоэффективный источник непрерывного дальнего вуф излучения для облучения образцов с большой суммарной

площадью / В.И. Донин // Письма в Журнал технической физики. 2009. Т. 35. № 5. С. 66-72.

5. Сухов Д. А. Исследование фотоэмиссии нуклеиновых кислот и родственных им соединений в области 120 – 250 нм / Д. А. Сухов, Н. Я. Додонова, Ф. И. Вилесов // Биофизика. 1976. Т. 21. № 5. С.817-819.

6. The vacuum ultraviolet photochemistry of nucleotides / N. Ya. Dodonova et al. // Photochem. Photobiol. 1982. V. 35. P. 129-132.

7. Ito A. Wavelength dependence for the inactivation of atp in the vacuum-ultraviolet region above 140 nm / A. Ito, T. Taniguchi, T. Ito // Photochem. Photobiol. 1986. V. 44. P. 273-277.

8. Цыганенко Н.М. Исследование фотопроцессов в основаниях нуклеиновых кислот в пленках и водных растворах под действием излучения в вакуумной ультрафиолетовой области спектра / Н.М. Цыганенко, И.В. Чижик, Н.Я. Додонова // Вестн. ЛГУ. Сер. 4. 1987. № 4. С. 80-82.

9. Photodimerization of uracil in films and its possible application for dosimetry of genetically active ultraviolet radiation / N.M. Tsyganenko et al. // Biophysics. 1987. Т. 32. № 1. С. 1-6.

10. Додонова Н.Я. О роли этиловых радикалов при синтезе аминокислот под действием вакуумной ультрафиолетовой радиации / Н.Я. Додонова, А.И. Сидорова // Биофизика. 1961. Т.6. Вып. 2. С.149-158.

11. Рощупкин Д.И. Молекулярные механизмы повреждения биомембран, липидов и белков под действием ультрафиолетового излучения: Дис.... д-ра биол. наук. М., 1979. 524 с.

12. Фотосинтез пептидов ВУФ-облучением тирозина / Е.В. Хорошилова, Н.М. Цыганенко, М.Ю. Петров, Н.Я. Додонова // Доклады Академии наук СССР. 1991. Т. 319. С. 1244.

13. Artyukhov V. G. Vacuum uv-radiation induced structural-functional changes in serum albumin molecules / V. G. Artyukhov, A. A. Pantyavin, G. A. Vashanov // Journal of Applied Spectroscopy. 2001. Т. 68. № 2. С. 291-298.

14. Артюхов В. Г. Структурно-функциональные изменения молекул гемоглобина человека, индуцированные вакуумным ультрафиолетовым светом / В. Г. Артюхов, А. А. Пантявин // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48. № 6. С. 734-740.

15. Пантявин А. А. Модификация физико-химических свойств молекул сывороточного альбумина, индуцированная вакуумным ультрафиолетовым излучением / А. А. Пантявин, В. Г.

Артюхов, Г. А. Вашанов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2000. № 2. С. 122-125.

16. Пантявин А. А. Структурно-функциональные изменения молекул оксигемоглобина человека в пленках индуцированные ультрафиолетовым излучением (118-266 нм) / А. А. Пантявин, М. А. Боровлева, В. Г. Артюхов // Сборник материалов докладов IV Всероссийского с международным участием конгресса студентов и аспирантов-биологов "Симбиоз Россия 2011" 23-27 мая 2011 г. Воронеж, 2011. С.113-116.

17. Пантявин А.А. Спектрофотометрическая оценка фотопревращений ВУФ-облученных молекул гемоглобина / А. А. Пантявин, Г. А. Вашанов, В. Г. Артюхов // сборник материалов докладов II Всероссийского съезда фотобиологов. 08-12 июня 1998 г. Пушино, 1998. С. 246-247.

18. Попов В.В. Мощные эксимерные лазеры и новые источники когерентного излучения в вакуумном ультрафиолете / В.В. Попов // УФН. 1985. Т. 147. № 3., Р. 587-604.

19. .Виноградов И.П., Додонова Н.Я. Спектрально-люминесцентные исследования белков в вакуумной ультрафиолетовой области спектра при 77 К / И.П. Виноградов, Н.Я. Додонова // Оптика и спектроскопия. 1971, Т.30, вып.5. С.868-871.

20. Черкашина Н.И. Исследование влияния вакуумного ультрафиолета на морфологию поверхности нанонаполненных полимерных композиционных материалов в условиях, приближенных к условиям околоземного космического пространства / Н.И. Черкашина, В.И. Павленко, А.С. Едаменко, П.В. Матюхин // Современные проблемы науки и образования. 2012. No 6. С. 130.

Воронежский государственный университет
Нгуен В. Х., аспирант кафедры биофизики и биотехнологии
E-mail: hiepcuaviet81@yahoo.com

Voronezh State University
Nguyen V. H., post-graduate student, Dept. of Biophysics and Biotechnology
E-mail: hiepcuaviet81@yahoo.com

Артюхов В. Г., д.б.н., профессор, зав. кафедрой биофизики и биотехнологии
Тел.: +7 (473) 220-85-86
E-mail: artyukhov@bio.vsu.ru

Artyukhov V. G., PhD (Biology), DSci., Full Professor, Head of the Department of Biophysics and Biotechnology
Ph.: +7 (473) 220-85-86
E-mail: artyukhov@bio.vsu.ru

Колтаков И. А., к.б.н., доцент каф. биофизики и биотехнологии
E-mail: koltakov@bio.vsu.ru

Koltakov I. A., PhD (Biology), Associate Professor, Dept. of Biophysics and Biotechnology
E-mail: koltakov@bio.vsu.ru

RESEARCH OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THIN FILMS OF BOVINE SERUM ALBUMIN IN THE CONDITIONS OF VUV RADIATION

V. Kh. Nguyen, V. G. Artyukhov, I. A. Koltakov

Voronezh State University

Abstract. Research of the processes of photochemical transformations of proteins, nucleic acids and their components under the influence of VUV-radiation with a long wave of quanta less than 200 nm, are important for the clarification of physico-chemical bases and regularities of its Biological action. However, the presence of a large number of chromophores for this high-energy section of the spectrum even in the composition of atmospheric air makes it impossible to work with water solutions of proteins.

The use of thin films of proteins on substrates from MgF₂ makes it possible to perform works in conditions close to high Earth orbits, where the contribution of atmospheric gases contributes minimal contribution to changing the intensity of light flux of light sources.

In the course of the study it was found that the registration of electronic spectra of protein absorption in thin films is a rather complicated procedure due to the significant contribution of the forces of intermolecular interaction and surface geometry Sample. There are revealed the patterns, allowing to allocate from an

electron spectrum of absorption a component of light dispersion and features of a surface which can be used for leveling of these systematic errors at carrying out of experiments.

The suggested methods of data processing allow to get more correct information about the investigated protein. It was found that its irradiation with UV-radiation ($\lambda_{\max} = 126 \text{ nm}$) in doses of 9.8 and 49 kJ/m^2 causes an increase in the intensity of the absorption band in the area of 190-220 nm by 8 and 10% respectively. In the case of the irradiation dose of 98 kJ/m^2 , the maximum intensity of the band was reported to be reduced by 20%. There were no statistically reliable differences from control in change of intensity of light absorption in the area of wavelengths of 270-285 nm for all investigated samples.

Thus, it can be assumed that vacuum UV radiation has a significant effect on the structure of serum albumin molecules. The increase in optical density in the area of 190-220 nm indicates that under the action of the Quantum of the range of UV-range of electromagnetic radiation used by us, a series of conformational rebuildings of the protein molecule occurs as a result of Direct action of VUV radiation, and at the expense of mediated action of radical products formed at photoionization of oxygen and water at absorption by them of high-energy quanta of light.

Keywords: . vacuum UV radiation, electronic absorption spectra, serum albumin.

REFERENCES

1. Biofizika: uchebnik dlja studentov vysshih uchebnyh zavedenij / V. G. Artjuhov i dr.; pod red. V. G. Artjuhova. Moskva: Akademicheskij proekt; Ekaterinburg: Delovaja kniga, 2013., 294 s.
2. Jeffektivnye istochniki UF- i VUF-izluchenija - jeksilampy i fotoreaktory na ih osnove / S. M. Avdeev i dr. // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika. 2017. T. 60. № 8. S. 31-35.
3. Nevjazhskaja I. A. Razrabotka i izgotovlenie istochnikov UF i VUF izluchenija v goi im. S.I. Vavilova / I.A. Nevjazhskaja, V.A. Tjapkov, N.V. Shilina, V.B. Shilov // Opticheskij zhurnal. 2012. T. 79. № 8. S. 108-111.
4. Donin V. I. Moshhnyj vysokojeffektivnyj istochnik nepreryvnogo dal'nego vuf izluchenija dlja obluchenija obrazcov s bol'shoj summarnoj ploshhad'ju / V. I. Donin // Pis'ma v Zhurnal tehnichejskoj fiziki. 2009. T. 35. № 5. S. 66-72.
5. Suhov D. A. Issledovanie fotojemissii nukleinovyh kislot i rodstvennyh im soedinenij v oblasti 120 – 250 nm / D. A. Suhov, N. Ja. Dodonova, F. I. Vilesov // Biofizika. 1976. T. 21. № 5. S.817-819.
6. The vacuum ultraviolet photochemistry of nucleotides / N. Ya. Dodonova et al. // Photochem. Photobiol. 1982. V. 35. P. 129-132.
7. Ito A. Wavelength dependence for the inactivation of atp in the vacuum-ultraviolet region above 140 nm / A. Ito, T. Taniguchi, T. Ito // Photochem. Photobiol. 1986. V. 44. P. 273-277.
8. Cyganenko N.M. Issledovanie fotoprocessov v osnovanijah nukleinovyh kislot v plenkah i vodnyh rastvorah pod dejstviem izluchenija v vakuumnoj ul'traioletovoj oblasti spektra / N.M. Cyganenko, I.V. Chizhik, N.Ja. Dodonova // Vestn. LGU. Ser. 4. 1987. № 4. S. 80-82.
9. Photodimerization of uracil in films and its possible application for dosimetry of genetically active ultraviolet radiation / N.M. Tsyganenko et al. // Biophysics. 1987. T. 32. № 1. C. 1-6.
10. Dodonova N.Ja. O roli jetilovyh radikalov pri sinteze aminokislot pod dejstviem vakuumnoj ul'traioletovoj radiacii / N.Ja. Dodonova, A.I. Sidorova // Biofizika. 1961. T.6. Vyp. 2. S.149-158.
11. Roshhupkin D.I. Molekuljarnye mehanizmy povrezhdenija biomembran, lipidov i belkov pod dejstviem ul'traioletovogo izluchenija: Dis.... d-ra biol. nauk. M., 1979. 524 c.
12. Fotosintez peptidov VUF-oblucheniem tirozina / E.V. Horoshhilova, N.M. Cyganenko, M.Ju. Petrov, N.Ja. Dodonova // Doklady Akademii nauk SSSR. 1991. T. 319. S. 1244.
13. Artyukhov V. G. Vacuum uv-radiation induced structural-functional changes in serum albumin molecules / V. G. Artyukhov, A. A. Pantjavin, G. A. Vashanov // Journal of Applied Spectroscopy. 2001. T. 68. № 2. S. 291-298.
14. Artjuhov V. G. Strukturno-funkcional'nye izmenenija molekul gemoglobina cheloveka, inducirovannye vakuumnym ul'traioletovym svetom / V. G. Artjuhov, A. A. Pantjavin // Radiacionnaja biologija. Radiojekologija. 2008. T. 48. № 6. S. 734-740.
15. Pantjavin A. A. Modifikacija fiziko-himicheskikh svojstv molekul syvorotochnogo al'bumina, inducirovannaja vakuumnym ul'traioletovym izlucheniem / A. A. Pantjavin, V. G. Artjuhov, G. A. Vashanov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Himija. Biologija. Farmacija. 2000. № 2. S. 122-125.
16. Pantjavin A. A. Strukturno-funkcional'nye izmenenija molekul oksigemoglobina cheloveka v

plenkah inducirovannye ul'traioletovym izlucheniem (118-266 nm) / A. A. Pantjavin, M. A. Borovleva, V. G. Artjuhov // Sbornik materialov dokladov IV Vserossijskogo s mezhdunarodnym uchastiem kongressa studentov i aspirantov-biologov "Simbioz Rossija 2011" 23-27 maja 2011 g. Voronezh, 2011. S.113-116.

17. Pantjavin A.A. Spektrofotometricheskaja ocenka fotoprevrashhenij VUF-obluchennyh molekul gemoglobina / A. A. Pantjavin, G. A. Vashanov, V. G. Artjuhov // sbornik materialov dokladov II Vserossijskogo s'ezda fotobiologov. 08-12 ijunja 1998 g Pushhino, 1998. S. 246-247.

18. Popov V.V. Moshhnye jeksimernye lazery i novye istochniki kogerentnogo izluchenija v

vakuumnom ul'raiolete / V.V. Popov // UFN. 1985. T. 147. № 3., P. 587-604.

19. Vinogradov I.P. Spektral'no-ljuminescentnye issledovanija belkov v vakuumnoj ul'traioletovoj oblasti spektra pri 77 K / I.P. Vinogradov, N.Ja. Dodonova // Optika i spektroskopija. 1971, T.30, vyp.5. S.868-871.

20. Cherkashina N.I. Issledovanie vlijanija vakuumnogo ul'traioleta na morfologiju poverhnosti nanonapolnennyh polimernyh kompozicionnyh materialov v uslovijah, priblizhjonnyh k uslovijam okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva / N.I. Cherkashina, V.I. Pavlenko, A.S. Edamenko, P.V. Matjuhin // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2012. No 6. S. 130.