

ANNALES
UNIVERSITATIS MARIAE CURIE-SKŁODOWSKA
LUBLIN — POLONIA

Vol. XXXI/XXXII, 7

Sectio AAA

1976/1977

Instytut Fizyki UMCS

Zakład Fizyki Ogólnej i Dydaktyki Fizyki

Kierownik: doc. dr hab. Danuta Stachórska

Władysław BULANDA, Tatiana PAŁCZYŃSKA

Zmiany oporu elektrycznego komórek *Nitellopsis obtusa* pod wpływem nadfioletu

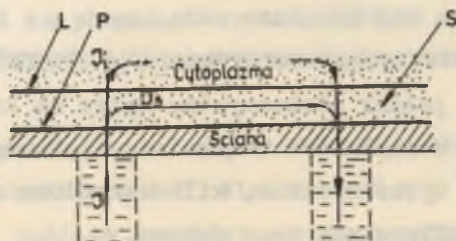
Изменения электрического сопротивления клеток *Nitellopsis obtusa* после действия ультрафиолетового излучения

The Changes of the Electrical Resistance of *Nitellopsis obtusa* Cells due to Ultraviolet Light

P. Jordan w r. 1938 i A. Szent-Györgyi w r. 1941 zwrócili uwagę na możliwość stosowania podstawowych koncepcji fizyki ciała stałego do wyjaśniania procesów przenoszenia elektronów w układach biologicznych. Próbę zastosowania teoretycznego modelu pasmowego do związków biologicznych przeprowadzili po raz pierwszy M. G. Evans i J. Gergely [7] w r. 1949, obliczając dla protein położenie pasm energetycznych występujących w poprzek łańcuchów peptydowych. Obliczenia, wykonane w sposób przybliżony, wskazywały na istnienie trzech bardzo wąskich pasm energetycznych o szerokości mniejszej od 0,2 eV w odległości około 3 eV jedno od drugiego. Transponowanie na związki organiczne zasad dotyczących półprzewodników nieorganicznych jest jednak bardzo ograniczone. Ze względu na słabe oddziaływania międzycząsteczkowe występujące w związkach organicznych, powstawanie pasm energetycznych kolektywnych, czyli obejmujących cały układ, jest bardzo utrudnione.

Powoduje to większą lub mniejszą lokalizację nośników w obrębie jednej cząsteczki. Z tego powodu trwają poszukiwania innych modeli przewodnictwa elektrycznego związków organicznych, np. wprowadzono model tunelowy, ekscytonowy, skokowy [3, 9], oraz występuje koncentracja na eksperymentalnych badaniach przewodnictwa elektronowego w tych związkach. Wiele prac z tej dziedziny [3, 5, 6, 9] poświęconych jest badaniu substancji o szczególnym znaczeniu biologicznym, takich jak: białka, aminokwasy czy kwasy nukleonowe. W pomiarach stosuje się większość metod znanych z fizyki ciała stałego, np. badanie zależności przewodnictwa elektrycznego od temperatury, pomiary efektu Halla, efektu termoelektrycznego, magnetooporu czy fotoprzewodnictwa. W wymienionych metodach stosuje się światło, ogrzewanie, pole magnetyczne, a więc czynniki wpływające na układy biologiczne i zachodzące w nich procesy. Stwarza to konieczność bardzo ostrożnej interpretacji wyników.

Celem pomiarów przedstawionych w artykule było zbadanie możliwości wykorzystania nadfioletu do wyindukowania fotoprzewodnictwa o charakterze elektronowym w komórkach glonów Characeae. Zasadnicza idea pomiarów oparta jest na zaobserwowanej w innych badaniach [11, 18] różnicy w wartościach oporu elektrycznego błony komórkowej, otrzymywanej w wyniku pomiarów dwoma różnymi metodami: metodą mikroelektrod i metodą elektrod zewnętrznych. Rozbieżność tę można było wyjaśnić przyjmując model błony komórkowej, zakładający istnienie dwu warstw wysokooporowych: P i L, przedzielonych warstwą S, charakteryzującą się wysokim przewodnictwem elektrycznym /ryc. 1/. Istnienie warstwy S wynikało także z innych pomiarów przeprowadzanych w naszym zespole [12, 13, 14, 18]. Ich wyniki sugerowały również, iż przewodnictwo tej warstwy może mieć charakter elektronowy. Przewodnictwo warstwy S odgrywa rolę jedynie wtedy, gdy prąd płynie wzdłuż komórki, czyli podczas pomiarów przeprowadzanych elektrodami zewnętrznymi, ponieważ przy pomiarach mikroelektrodowych prąd przepływa jedynie w poprzek błony komórkowej



Ryc. 1. Model odcinka komórki *Nitellopsis obtusa* przedstawiający dwie warstwy P i L, przedzielone przewodnikiem S, wzdłuż którego przepływa część prądu wpływającego do komórki; I - całkowite natężenie prądu, I_a - natężenie prądu płynącego przez wodniczkę komórki

/ryc. 2/. Promienie nadfioletowe mają wystarczającą energię, aby generować dodatkowe nośniki prądu elektrycznego. Jeżeli nośniki te zostaną wytworzone w błonie komórkowej, będą powodować zwiększenie przewodnictwa warstwy S, a zmiana ta, tak jak wszelkie procesy elektronowe, powinna przebiegać szybko. Z powyższych rozważań wynika, że promieniowanie nadfioletowe powinno wywierać istotniejszy wpływ na pomiary wykonywane metodą elektrod zewnętrznych. Istnienie przewodnictwa elektronowego w badanych komórkach uwidaczniałoby się więc w niejednakowym oddziaływaniu nadfioletu na wartości oporu błony, otrzymane przy użyciu mikroelektrod i przy użyciu elektrod zewnętrznych, oraz w szybkim narastaniu zmian tego oporu. Należy uwzględnić, że badana różnica w wartościach oporu może być niewielka z tego względu, że w przewodzeniu prądu w komórce zasadniczy udział mają niewątpliwie jony, a ewentualne przewodnictwo elektronowe stanowi tylko niewielką część całego przewodnictwa.

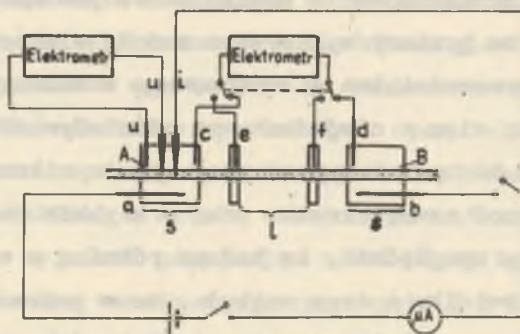
Wykorzystanie w pomiarach nadfioletu zamiast światła widzialnego spowodowane było dwoma względami: po pierwsze - zakres nadfioletu leży poza zakresem fotosyntezy, po drugie zaś - większa energia nadfioletu zwiększa możliwość wytwarzania elektronów. Wydajność fotosyntezy jest maksymalna w obszarze 410-450 nm i 640-680 nm i pokrywa się z widmem absorpcji chlorofilu. Nafiolet

nie zwiększa fotosyntezy, dzięki czemu przy interpretacji otrzymanych wyników unika się kłopotów związanych z uwzględnieniem wpływu reakcji chemicznych, towarzyszących fotosyntezie. Działanie nadfioletu wywiera jednak niekorzystny wpływ na komórki [10, 16], powodując np. zmianę w szybkości krążenia cytoplazmy. Podczas pomiarów stosowano więc tylko krótkie, kilkusekundowe oświetlenia komórek, w celu zminimalizowania tego wpływu.

MATERIAŁ POMIAROWY I APARATURA

Pomiary przeprowadzono w okresie od marca do września 1976 r. na komórkach *Nitellopsis obtusa*, pochodzących z hodowli laboratoryjnej.

W badaniach zastosowano układ pozwalający wykonywać pomiary oporu błony komórkowej zarówno metodą mikroelektrod cieczowych, jak i metodą elektrod zewnętrznych; były nimi elektrody chlorosrebrne Ag/AgCl /ryc. 2/. Mikroelektrodami mierzono opór komórki na



Ryc. 2. Schemat zestawu do pomiaru potencjału spoczynkowego i oporu komórek metodami mikroelektrod i elektrod zewnętrznych; objaśnienia w tekście.

odcinka $s = 2$ cm, zanurzoną w naczyniu A; mikroelektroda i, doprowadzająca prąd do wnętrza komórki, umieszczona była w środku odcinka s, natomiast mikroelektroda u, mierząca napięcie, znajdowała się w odległości 0,2 s od niej. Taki sposób wprowadzenia mikroelektrod powoduje uproszczenie obliczeń, ponieważ pozwala

poninąć efekt kablowy [8, 18]. Mikroelektrody wprowadzono do wnętrza komórki za pomocą mikromanipulatora mechanicznego, przebieg wbijania kontrolując pod mikroskopem /powiększenie 50 x lub 100 x/.

Przy pomiarach oporu elektrodami zewnętrznymi prąd doprowadzano do zbiorników A i B elektrodami a i b; elektrody c i d rejestrowały - podczas przepływu prądu o natężeniu I' - spadek napięcia ΔU . Całkowity opór komórki obliczany był ze wzoru $R_c = \frac{\Delta U}{I}$. Elektrodami e i f, zanurzonymi w dodatkowych wąskich naczyniach, znajdujących się między zbiornikami A i B /ryc. 2/, mierzono spadek napięcia ΔU_L na odcinku l i stąd obliczano opór wnętrza jednostki długości komórki $R_1 = \frac{\Delta U_L}{I \cdot l}$. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyliczano opór jednostki długości błony komórkowej R_m , uwzględniając, w przypadku elektrod zewnętrznych, efekt kablowy [11, 18].

Pomiary potencjału spoczynkowego badanych komórek wykonywano za pomocą elektrometru, wykorzystując mikroelektrodę u i elektrodę zewnętrzną u.

Pomiary zostały przeprowadzone przy użyciu prądu stałego, którego źródłem był układ baterii o sile elektromotorycznej 4,5 V, z opornikami ograniczającymi natężenie prądu i potencjometrami do ciągłej jego regulacji. Natężenie prądu mierzono wyskalowanym mikroamperomierzem /1 działka = 0,014 μA / po wzmocnieniu na tranzystorowym wzmacniaczu prądu stałego. Układ napięciowy zawierał elektrometr VAJ-51 RFT o oporze wejściowym $10^{15} \Omega$ i ośmiu zakresach pomiarowych /1 mV - 3 V/. Elektrometr ten ma wbudowany układ kompensacyjny, co pozwala na wykorzystanie przy pomiarach bardziej czułych zakresów przyrządu. Wskazania elektrometru rejestrowane były na taśmie urządzenia rejestrującego /samopis G1B1 VEB Carl Zeiss Jena/, przez co uzyskiwano ciągły zapis mierzonych napięć. Źródłem światła nadfioletowego była lampa kwarcowa L6/58 ze szczeliną 0,5 cm; komórkę oświetlano z odległości ok. 10 cm.

POMIARY

Opisaną aparaturę wykorzystano do przeprowadzenia następujących pomiarów:

- 1/ wpływu nadfioletu na potencjał spoczynkowy komórek;
- 2/ wpływu liczby oświetleń komórki na wielkość potencjału spoczynkowego;
- 3/ wpływu nadfioletu na opór błony komórkowej mierzony mikroelektrodami;
- 4/ wpływu nadfioletu na opór wnętrza komórki mierzony elektrodami zewnętrznymi;
- 5/ wpływu nadfioletu na opór błony komórkowej mierzony elektrodami zewnętrznymi.

Pomiary wymienione w punktach 1, 2 i 4 umożliwiły pełniejszą i dokładniejszą analizę rezultatów zasadniczych pomiarów, przedstawionych w punktach 3 i 5.

WYNIKI POMIARÓW

1. Wstępnie zostały przeprowadzone pomiary zmian potencjału elektrod, zanurzonych w wodzie akwariowej, zachodzące pod wpływem oświetlenia nadfioletem. Wykonano je dla sprawdzenia, czy badane zmiany potencjału w komórkach nie powstają wyłącznie wskutek działania nadfioletu na elektrody lub elektrolit. Naczynia pomiarowe A i B /ryc. 2/ połączono rurką zawierającą elektrolit. Pomiary potencjału wykonywano przy oświetleniu naczynia A, zawierającego elektrody, oraz naczynia B, czyli obszaru poza elektrodami. Pomiary wykonano dla 8 elektrod. Następnie przeprowadzono pomiary potencjału dla 10 komórek, oświetlając część komórki, w której były elektrody /A/, oraz część poza elektrodami /B/.

Stwierdzono, że zarówno w wodzie akwariowej, jak i w komórkach nadfiolet powoduje zmniejszenie potencjału. W przypadku wody zmiany te mają inną wartość oraz inny przebieg niż zachodzące w komórkach. Średnia względna zmiana potencjału w wodzie wynosiła 3,3% przy oświetleniu elektrod i 0,22% przy świeceniu poza elektrodami.

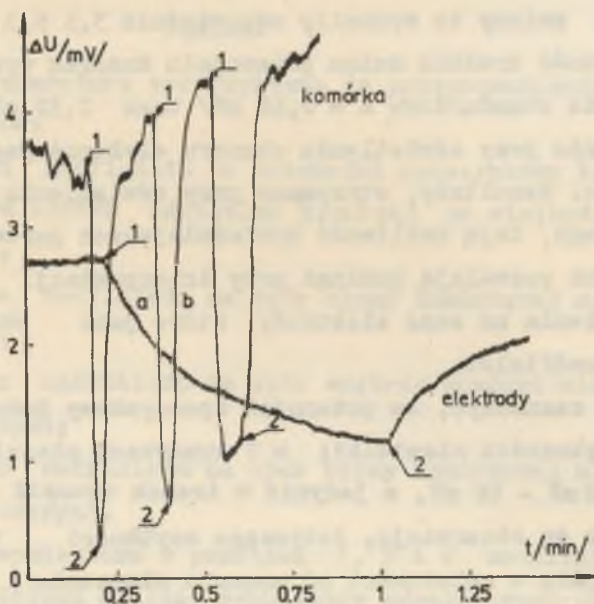
Dla komórek zmiany te wynosiły odpowiednio 3,5 % i 0,9 %. Bez względu na wartość średnia zmian potencjału komórek wynosiła 2,3 mV /odchylenie standardowe $s = 0,69$ mV/ oraz 0,32 mV / $s = 0,15$ mV/ odpowiednio przy oświetleniu obszaru elektrodowego i pozaelektrodowego. Rezultaty, otrzymane przy oświetleniu obszaru pozaelektrodowego, dają możliwość dokładniejszych porównań i wniosków, ponieważ pozwalają pominąć przy interpretacji wyników wpływ oświetlenia na same elektrody, które jako chlorosrebrne czułe są na nadfiolet.

Należy zaznaczyć, że potencjał spoczynkowy badanych komórek był w większości niewielki; w 7 komórkach mieścił się w przedziale 28 mV - 52 mV, a jedynie w trzech wynosił ok. 100 mV.

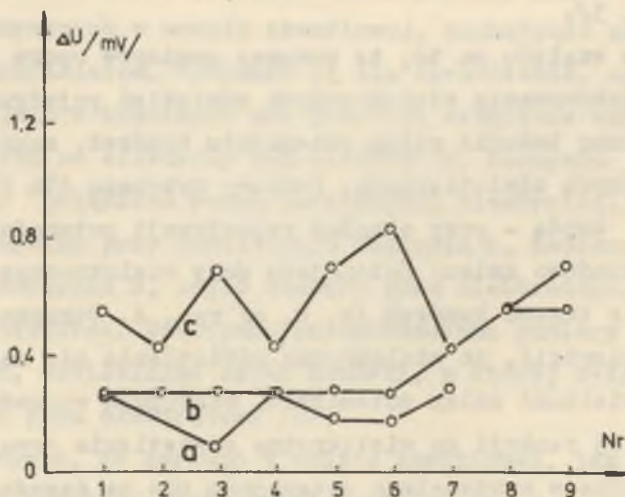
Istotne są obserwacje, dotyczące szybkości wystąpienia zmian potencjału w zależności od momentu włączenia i wyłączenia oświetlenia. Nie zauważa się opóźnień w wystąpieniu zmiany potencjału w stosunku do rozpoczęcia i zakończenia oświetlania, jednak dla elektrody zanurzonej w wodzie proces narastania zmiany potencjału jest w obu przypadkach znacznie wolniejszy niż dla komórek /ryc. 3/.

2. Ze względu na to, że podczas pomiarów oporu istnieje konieczność dokonywania wielokrotnych oświetleń pojedynczej komórki, przeprowadzono badania zmian potencjału komórek, zachodzących przy kilku kolejnych oświetleniach. Pomiarów wykonano dla 10 komórek, oświetlając każdą - przy ciągłej rejestracji potencjału - 6 do 10 razy. Przykładowo zmiany potencjału przy wielokrotnym oświetlaniu pokazuje dla trzech komórek /a, b, c/ ryc. 4. Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że wielokrotne oświetlenia nie mają istotnego wpływu na wielkość zmian potencjału. Występują wprawdzie komórki o silniejszej reakcji na wielokrotne oświetlenia /ryc. 4c/, ale w nich różnice w wartościach potencjału nie są zasadnicze.

3. Pomiarów oporu błony komórkowej przy użyciu mikroelektrod wykonano, mierząc spadek napięcia na błonie dla kilku /od 4 do 9/



Ryc. 3. Zmiany potencjału spoczynkowego komórki i potencjału elektrody zachodzące pod wpływem nadfioletu /1 - włączenie oświetlenia, 2 - wyłączenie oświetlenia/, zapisane na samopisie



Ryc. 4. Zmiany potencjału spoczynkowego komórek spowodowane wielokrotnym oświetlaniem nadfioletem /Nr - numer kolejnego oświetlenia/

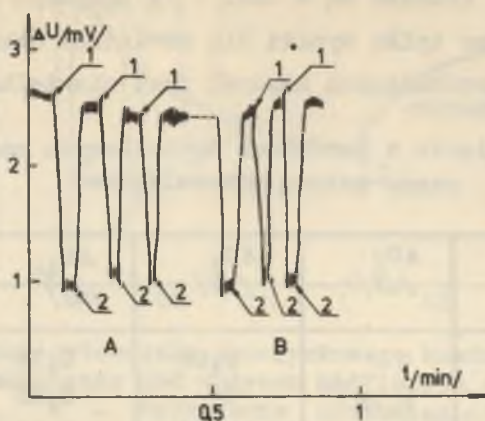
różnych wartości natężenia prądu elektrycznego. Natężenie to zmieniano w przedziale od 0,04 μA do 0,38 μA . Przed pomiarem kompensowano potencjał spoczynkowy komórki i dla danej wartości natężenia prądu mierzono kilkakrotnie napięcie, biorąc do obliczeń oporu wartość średnią. Komórkę oświetlano w obszarze, gdzie znajdowały się elektrody /zbiornik A/, i w obszarze poza elektrodami /zbiornik B/. Wyniki pomiarów zebrane są w tab. 1 /z przyczyn podanych w punkcie 2, przedstawiono tylko wyniki dla oświetleń obszaru poza elektrodami/. Liczba przebadanych komórek jest niewielka, ponieważ czas

Tab. 1. Zmiany napięcia w komórkach oświetlonych nadfioletem, zmierzone metodą mikroelektrod

I / μA /	ΔU_1 /mV/	ΔU_2 /mV/	ΔU_3 /mV/	ΔU_4 /mV/	ΔU_5 /mV/
0,04	1,48	0	0,08	0,38	0,46
0,08	1,30	0,28	0	0,46	0,76
0,12	1,46	0,28	0,18	0,14	0,75
0,17	1,57	0,42	0,52	0,28	0,65
0,21	2,10	0	0,56		
0,25	1,18	0,20	0,26		
0,30	1,40				
0,34	1,18				
0,38	1,15				
ΔU_{sr} mean value ΔU /mV/	1,42	0,19	0,27	0,31	0,65
S /mV/	0,13	0,08	0,13	0,17	0,07

I - natężenie prądu płynącego przez komórkę, ΔU_i - zmiany napięcia na i-tej komórce, S - odchylenie standardowe.

pełnego pomiaru wynosił ok. 2,5 godz. i tylko niektóre komórki wytrzymały tak długi pomiar. Analiza wyników umieszczonych w tab. 1 pozwala stwierdzić, że nie występuje określona zależność między mierzonym na komórce napięciem a natężeniem płynącego prądu; zmiana natężenia prądu wpływa zresztą w niewielkim stopniu na wartość napięcia /ryc. 5/.



Ryc. 5. Zmiany napięcia na komórce podczas oświetlenia nadfioletem, uzyskane metodą mikroelektrodową i zarejestrowane na samopisie; A - $I = 0,12 \mu\text{A}$, B - $I = 0,30 \mu\text{A}$, 1 - włączenie oświetlenia, 2 - wyłączenie oświetlenia

4. Przy wyliczeniach oporu błony komórkowej R_m , opartych na pomiarach wykonanych elektrodami zewnętrznymi, konieczna jest znajomość oporu wnętrza komórki R_1 . Dlatego też należało sprawdzić, czy wartość tego oporu nie ulega zmianie przy oświetleniu i uwzględnić wynik eksperymentu przy obliczeniach R_m . Dla kilku wartości natężenia prądu mierzono zmianę napięcia między elektrodami umieszczonymi w naczyniach C i D /ryc. 2/, oświetlając przy tym komórkę promieniowaniem nadfioletowym. Wyniki pomiarów dla trzech przykładowych komórek zebrane są w tab. 2. Wyraźnie daje się zauważyć, że mierzone zmiany napięcia nie zależą od natężenia prądu płynącego przez komórkę. Na przykład dla komórki nr 3 przy różnych natężeniach prądu w przedziale od $0,07 \mu\text{A}$ do

0,28 μA wszystkie zmiany napięcia są bliskie 2,5 mV i w granicach błędu praktycznie jednakowe.

Tab. 2. Zmiany napięcia ΔU mierzone na oporze wnętrza komórek przy różnych natężeniach prądu podczas oświetlania nadfioletem

I / μA /	ΔU_1	ΔU_2	ΔU_3
0,07	5,88	4,05	2,68
0,14	2,70	4,75	2,80
0,21	2,60	4,85	2,50
0,28	3,34	3,50	2,05
0,35	2,46		
R_1 /k Ω /cm	108,5	77,5	50,05

R_1 - opór wnętrza komórki.

5. Pomiaru oporu błony komórkowej metodą elektrod zewnętrznych wykonano dla 4-5 wartości natężenia prądu, mierząc zmiany napięcia na komórkach przy oświetleniu nadfioletem obszaru między elektrodami /między naczyniami A i B/. Pomiaru i wyliczenia, uwzględniające efekt kablowy, przeprowadzone były dla czterech komórek. Przykładowe wyniki dla jednej komórki oraz wartości średnie dla wszystkich przedstawione są w tab. 3. Analiza wyników wykazuje, że zmiany napięcia ΔU , zmierzone podczas przepływu prądu w momencie oświetlania komórek nadfioletem, są wprost proporcjonalne do natężenia prądu I, czyli stosunek $\frac{\Delta U}{I}$ jest stały /ryc. 6/. Oznacza to, że opór błony komórkowej maleje pod wpływem nadfioletu o stałą wartość ΔR_m . Średnia wartość ΔR_m wynosi 5,7 k Ω cm /s = 0,95 k Ω cm/, co stanowi 5,5 % średniej wartości R_m /105 k Ω cm/. Cechą charakterystyczną wszystkich pomiarów dotyczących wpływu nadfioletu na potencjał i opór błony komórek *Nitellopsis obtusa* była bardzo szybka kinetyka zachodzących zmian /ryc. 3, 5, 6/. Włączenie oświetlenia powodowało bardzo szybkie /bez zauważalnego opóźnienia/ rozpoczęcie zmiany mierzonego napięcia oraz szybki jej

Tab. 3. Wpływ nadfioletu na obniżenie oporu komórek *Nitellopsis obtusa* mierzonego metodą elektrod zewnętrznych; a) wartości dla 1 z badanych komórek, b) wartości średnie dla 4 komórek

a)

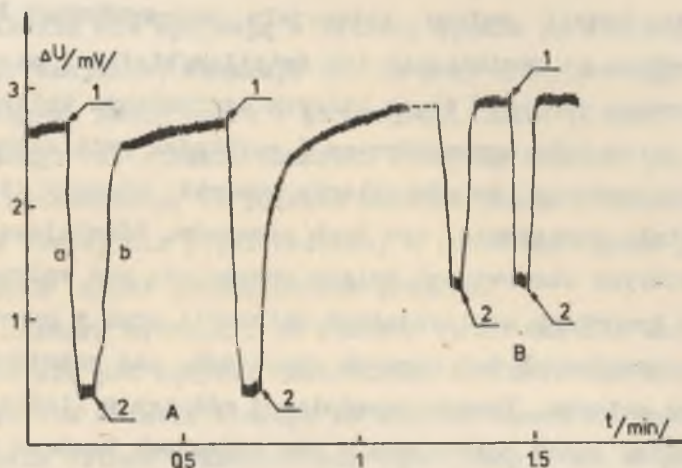
I / μ A/	ΔU /mV/	R_c /k Ω /	R_m /k Ω cm/	ΔR_m /k Ω cm/
0,07	0,75	221	70	10,0
0,14	1,30	320	73	7,0
0,21	1,35	225	73,5	6,6
0,28	1,76	227	75	5,6
0,35	2,65	224	73	7,0

b)

Nr komórki	1	2	3	4
R_m /k Ω cm/	150	95	103	75
ΔR_m /k Ω cm/	4	4,1	7,5	7,2
$S\Delta R_m$ /k Ω cm/	0,85	0,7	0,9	0,75

ΔU - zmiany napięcia podczas oświetlenia, R_c - opór całkowity komórki po oświetleniu, R_m - opór jednostki długości błony komórkowej po oświetleniu, ΔR_m - zmiany oporu R_m po oświetleniu.

przebieg, aż do momentu osiągnięcia nowego stanu równowagi. Po wyłączeniu oświetlenia od razu rozpoczyna się powrót napięcia do wartości wyjściowej; jego przebieg także jest szybki, chociaż wykazuje pewne opóźnienie /część b ryc. 3, 6/ w porównaniu z przebiegiem zmiany po włączeniu oświetlenia /część a ryc. 3, 6/.



Ryc. 6. Zmiany napięcia na komórce podczas oświetlenia nadfioletem, uzyskane metodą elektrod zewnętrznych i zapisane na samopisie; A - $I = 0,15 \mu\text{A}$, B - $I = 0,07 \mu\text{A}$, 1 - włączenie oświetlenia, 2 - wyłączenie oświetlenia

DYSKUSJA WYNIKÓW

Przeprowadzone pomiary pozwalają na wyciągnięcie kilku wniosków, dotyczących wpływu promieniowania nadfioletowego na potencjał spoczynkowy oraz zmianę przewodnictwa błony komórkowej glonów *Nitellopsis obtusa*. Wyniki uzyskane z pomiarów potencjału spoczynkowego sugerują, że mechanizm jego zmian pod wpływem oświetlenia nadfioletem nie jest spowodowany zmianą aktywności chemicznej komórek, która wynikałaby ze zwiększenia szybkości fotosyntezy. Z jednej strony przemawia za tym fakt, że zakres nadfioletu znajduje się poza widmem absorpcji chlorofilu, z drugiej zaś - zbyt szybka, jak na wynik reakcji chemicznej, kinetyka procesu.

W literaturze znaleźć można przykłady badania zmian potencjału spoczynkowego komórek podczas oświetlania oraz próby wyjaśnienia tych zmian w powiązaniu z fotosyntezą. Andrianow

1 współprac. badali zmiany potencjału spoczynkowego komórek *Nitella flexilis* po oświetleniu ich światłem białym i czerwonym [1, 2]. Pierwsze pomiary [1], w których stwierdzono zbliżony przebieg zmian potencjału spoczynkowego i szybkości wydzielania się produktów fotosyntezy po oświetleniu komórki, zdawały się wskazywać na ścisłe powiązanie obu tych procesów. Późniejsze pomiary [2], w których obserwowano zmiany potencjału pod wpływem oświetlenia w komórkach zawierających chlorofil oraz w prawie zupełnie go pozbawionych tak zwanych rizoidach, nie potwierdziły jednak takiego związku. Pomimo zasadniczej różnicy w ilości chlorofilu, przebieg zmian potencjału w obu rodzajach komórek był prawie jednakowy, co świadczy, że między zmianami potencjału i fotosyntezą istnieje tylko pośredni związek.

Rezultat ten potwierdza, że wyniki naszych pomiarów nie mogą być wyjaśniane /ze względu na nadfiolet/ procesami związanymi z fotosyntezą. Lepsze wyjaśnienie zmierzonych przez nas zmian potencjału można uzyskać na podstawie rezultatów otrzymanych przez Sandersa i współprac. [10]. Badali oni oddziaływanie nadfioletu na komórki drożdży i stwierdzili zmianę w przepływie jonów sodu i potasu przez błonę po oświetleniu, co w konsekwencji prowadziło do zmiany stężenia jonów we wnętrzu komórki. Autorzy pracy [10] przypuszczają, że nadfiolet, który może być absorbowany przez lipidy i białka, oddziałuje na błonę komórkową i zmienia warunki przepływu jonów, prawdopodobnie przez zmianę bariery dyfuzyjnej i tworzenie naładowanych grup w białkach na powierzchni komórki. Zmiana koncentracji jonów następuje pod wpływem tych czynników stosunkowo szybko, a ponieważ potencjał spoczynkowy komórek zależy od różnicy koncentracji jonów wewnątrz i na zewnątrz komórki, powyższe stwierdzenia mogą jakościowo wyjaśniać zmiany potencjału, zachodzące pod wpływem nadfioletu w komórkach *Nitellopsis obtusa*.

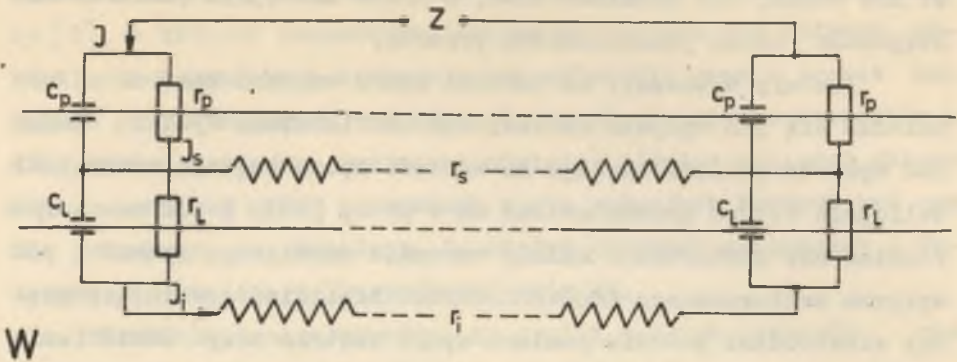
Wyniki badań zmian potencjału spoczynkowego komórek pod wpływem kolejnych oświetleń nadfioletem wykazały, że wielokrotne

oświetlenia nie wpływają w istotny sposób na wielkość mierzonych potencjałów. Wskazuje to, że przy interpretacji wyników, dotyczących zmian oporu i potencjałów, można pominąć wpływ wielokrotnego oświetlania komórek. Powyższy wniosek jest tym bardziej uzasadniony, że podczas każdego pomiaru oświetlano komórki nie więcej niż pięciokrotnie, a przed następnym pomiarem następowała około jednonominutowa przerwa.

Pomiary wykazały, że wartość oporu wnętrza komórek nie zmienia się pod wpływem oświetlenia nadfioletem. Wyniki badań nad wpływem światła białego na wartość oporu wnętrza komórek *Nitellopsis obtusa* przedstawione są w pracy [18]. W pomiarach tych również nie stwierdzono zmiany wartości omawianego oporu pod wpływem zastosowanego promieniowania. Napięcie, powstające między elektrodami podczas pomiaru oporu wnętrza przy oświetleniu nadfioletem, pochodzi prawdopodobnie ze zmian potencjału komórek po oświetleniu i od zjawisk zachodzących na samych elektrodach pod wpływem promieniowania rozproszonego.

W pomiarach zmian oporu błony komórkowej, przeprowadzonych metodą mikroelektrod i metodą elektrod zewnętrznych, otrzymano różne rezultaty. Zmiany napięcia zmierzone metodą mikroelektrod /tab. 1/ nie wykazują żadnego uporządkowania w stosunku do natężenia prądu, czyli nie wskazują, aby pod wpływem oświetlenia nadfioletem występowała zmiana oporu błony komórkowej. Omówione powyżej zmiany w samej błonie komórkowej, powstające pod wpływem nadfioletu, wyraźnie uwidaczniają się jedynie w zmianie potencjału spoczynkowego komórki. Są one widocznie tego rodzaju, że nie wpływają na zmianę poprzecznego przewodnictwa błony. W wynikach pomiarów przeprowadzonych metodą elektrod zewnętrznych można natomiast wyraźnie zauważyć prawidłowość /tab. 3/, pozwalającą określić zmianę /zmniejszenie/ oporu błony komórkowej po oświetleniu nadfioletem. Rozbieżne wyniki uzyskane przy pomiarach różnymi elektrodami są trudne do interpretacji w inny sposób, aniżeli

zakładając dwuoporowy model błony komórkowej, omówiony we wstępie artykułu. Schemat tego modelu, będący elektrycznym odpowiednikiem elementu komórki pokazanego na ryc. 1, przedstawiony jest na ryc. 7. Mikroelektroda wprowadzona do wnętrza komórki /wodniski/ mierzy spadek napięcia w poprzek błony, czyli na oporach



Ryc. 7. Oporowo-pojemnościowy model przewodnictwa elektrycznego odcinka komórki; r_p , r_L - opory warstw P i L, c_p , c_L - pojemności warstw P i L /patrz ryc. 1/, Z - całkowita zawada komórki

r_p i r_L , ponieważ cały prąd od elektrody zewnętrznej do mikroelektrody przepływa w poprzek błony komórkowej. Z wykonanych doświadczeń wynika więc, że wartości oporów r_p i r_L nie zmieniają się pod wpływem nadfioletu lub że są tak małe, iż nie można ich stwierdzić metodą mikroelektrod. W pomiarach przeprowadzonych przy użyciu elektrod zewnętrznych, prąd przepływa między elektrodami wzdłuż komórki /ryc. 1, 7/, skąd wynika, że część prądu płynie wzdłuż warstwy S. Zmniejszenie oporu błony, stwierdzone przy pomiarach wykonywanych tą metodą, świadczy - przy ustaleniu, iż opory r_p , r_L i R_1 pozostają te same - że to przewodnictwo warstwy S zmienia się pod wpływem oświetlenia nadfioletem. Zmianę tę daje się objaśnić generowaniem przez nadfiolet dodatkowych nośników prądu elektrycznego. Szybkość zachodzących zmian sugeruje, że są to nośniki typu elektronowego i one przyczyniają się do wzrostu natężenia prądu płynącego wzdłuż komórki

Wyjaśnienie takie jest także całkowicie zgodne z wynikami poprzednio przeprowadzonych pomiarów, dotyczących możliwości wystąpienia przewodnictwa niejonowego w całych strukturach komórkowych[4, 15].

Przebieg zmian badanych parametrów jest szybki, chociaż wykazuje pewną, niewielką zależność czasową /ryc. 3, 5, 6/. Nie stanowi ona jednak przeszkody, która wykluczałaby możliwość istnienia nośników typu elektronowego w opisywanych zjawiskach. Szybkość procesów elektronowych w związkach /półprzewodnikach/ organicznych jest bowiem z reguły znacznie mniejsza od szybkości analogicznych procesów w półprzewodnikach nieorganicznych[3, 9, 17]. Wynika to z dużo mniejszej ruchliwości nośników w substancjach organicznych, spowodowanej brakiem odpowiednio wykształconej w nich struktury pasmowej, oraz licznymi pułapkami związanymi z niedoskonałościami struktury krystalicznej.

Dane zawarte w tej pracy są w pewnej części tylko jakościowe i nie pretendują do pełnego wyjaśnienia przewodnictwa elektrycznego błony komórkowej pod wpływem oświetlenia nadfioletem. Można jednak uważać je za jeden z punktów wyjścia do badań, które należy prowadzić w celu lepszego opisanie i wyjaśnienia natury przewodnictwa elektrycznego w całych strukturach biologicznych.

PISMIENNICTWO

1. А н д р я н о в В.К., Бу л ь ч е в А.А., Л и т в и н Ф.Ф.: Биофизика 10, 531 / 1965 /.
2. А н д р я н о в В.К., Бу л ь ч е в А.А., Куу р е л л а Т.А. Л и т в и н Ф.Ф.: Биофизика 15, 190 /1970/.
3. Б о г у с л а в с к и й Л.И., В а н н и к о в А.В.: Органические полупроводники и биополимеры, Изд. "Наука", Москва 1968.

4. Bulanda W., Skierczyńska J.: *Folia Soc. Scien. Lublinensis* 16, 69 /1974/ *Mat-Phys-Chem.* 2.
5. Eley D.D., Spivey D.I.: *Nature* 188, 725 /1960/.
6. Eley D.D., Spivey D.I.: *Trans. Farad. Soc.* 58, 405 /1962/.
7. Evans M.G., Gergely J.: *B.B.A.* 3, 188 /1949/.
8. Hogg J., Williams E.J., Johnston R.J.: *B.B.A.* 150, 518 /1968/.
9. Kryszewski M.: *Półprzewodniki wielkocząsteczkowe*, PWN, Warszawa 1973.
10. Sanders R.T., Giese A.C.: *J. Gen. Phys.* 42, 589 /1959/.
11. Skierczyńska J., Żoźnierczuk R., Spiewła E., Bulanda W., Przygodzka A.: *J. exp. Bot.* 23, 591 /1972/.
12. Skierczyńska J., Spiewła E., Żoźnierczuk R., Bulanda W., Wardak A.: *J. exp. Bot.* 24, 1015 /1973/.
13. Skierczyńska J., Spiewła E., Bulanda W., Żoźnierczuk R., Sielewiesiuk J.: *J. exp. Bot.* 24, 47 /1973/.
14. Skierczyńska J., Żoźnierczuk R., Bulanda W.: *J. exp. Bot.* 24, 38 /1973/.
15. Skierczyńska J., Bulanda W., Gładyszewski L., Kubacka Z., Kutnik J., Ostrokólski J., Wardak A.: *Studia Biophysica / w druku/*.
16. Strebeuko P.: *Fotobiologia*, PWN, Warszawa 1971.
17. Владимиров Ю.А., Тимофеев К.Н.: *Биофизика* 11, 33 /1966/.
18. Żoźnierczuk R.: *Wpływ czynników zewnętrznych na własności elektryczne komórek Nitellops obtusa i Charabrauni*, Lublin 1973 /praca doktorska/.

РЕЗЮМЕ

Исследовалось влияние ультрафиолетового излучения на потенциал покоя, внутреннее сопротивление R_i и сопротивление мембраны R_m клеток *Nitellopsis obtusa*. Измерения показали, что ультрафиолетовое излучение понижает потенциал покоя в среднем на 0,9% и не вызывает изменения внутреннего сопротивления клеток. Изменения сопротивления клеточной мембраны после облучения нельзя регистрировать микроэлектродами, а можно только внешними электродами. Представлено объяснение этой расходимости принимая, что ультрафиолетовое излучение генерирует в клеточной мембране электронные носители электрического тока.

SUMMARY

The effect of ultraviolet light on the resting potential, the interior resistance R_i and the membrane resistance R_m of the *Nitellopsis obtusa* cells was examined. The measurements showed that ultraviolet irradiation decreased the resting potential but did not influence the interior resistance of the cells. The mean value of the resting potential changes was 0,9 per cent. The changes in the membrane resistance after ultraviolet irradiation were not registered by the microelectrodes but only by the external electrodes. This discrepancy may be explained by the assumption that ultraviolet light generates the electron carriers of the cell membrane.

