1987. 134, N 11. Р. 2932. [6] Аллсалу М.-Л. Ю., Бельский А. Н., Михайлин В. В. и др.//Матер. VI Всесоюз. симп. «Люминесцентные приемники и преобразователи ионизирующего излучения». Львов, 1988. С. 5. [7] Агапов М. Н., Кондаков О. В., Михайлин В. В., Съестнова В. В., Терещенко В. В. Деп. ВИНИТИ № 3251—84 Деп. от. 21.05.1984. [8] Ельяшевич М. А. Спектры редких вемель. М., 1953. [9] Казапо Н., Медити К., Уататото Н.//J. Electrochem. Soc. 1984. 131, N 8. Р. 1953. [10] Fujikawa T., Okazawa T., Yamasaki K. et al.//J. Phys. Soc. Japan. 1989. 58, N 8. Р. 2952.

Поступила в редакцию 24.01.92

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1992. Т. 33, № 6

УДК 535.372.2

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ СВЕТОВОЙ РЕГУЛЯЦИИ КВАНТОВОГО ВЫХОДА ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ФИТОПЛАНКТОНА *in situ* методами импульсной лазерной флуориметрии

М. Ю. Горбунов, А. М. Чекалюх

(кафедра квантовой радиофизики)

В натурных условиях исследованы механизмы влияния естественной освещенности на величину начального (Φ^0) и максимального (Φ^{max}) уровней квантового выхода флуоресценции фитопланктона, а также эффективность первичных стадий фотосинтеза. Измерения Φ^0 и Φ^{max} в дистанционном режиме и в пробах фитопланктона проводились по двухимпульсной лазерной методике. Показано, что основными механизмами световой регуляции выхода флуоресценции являются «энергозависимое» тушение флуоресценции, проявляющееся при освещенностях порядка 5—20 клк, и фотоингибирование первичных стадий фотосинтеза, доминирующее при освещенностях 30—100 клк.

1. Введение

Благодаря высокой чувствительности и возможности измерений in situ с помощью погружаемых зондов [1] и лидаров [2-4] флуориметрические методы успешно применяются в океанологических исследованиях для оценки биологических параметров водных масс (концентрация хлорофилла а [1, 2], фотосинтетическая активность [3, 4]). Этн методы основаны на регистрации интенсивности флуоресценции хлорофилла a (Хл «а»), являющейся побочным продуктом первичных фотосинтетических реакций, при возбуждении исследуемого объема воды импульсным источником света (лампой, лазером). При проведении натурных измерений различными исследователями [1, 5] отмечались периодические изменения интенсивности флуоресценции в течение суток. Очевидно, что это явление может определяться как суточными вариациями концентрации фитопланктона, так и суточными вариациями квантового выхода флуоресценции Хл «а» in vivo. Для получения корректных оценок биологических параметров по результатам флуориметрических измерений in situ необходимо адекватно учитывать вклады каждой из этих компонент. Кроме того, изучение механизмов суточных изменений эффективности флуоресценции Хл «a» in vivo представляет самостоятельный научный интерес для биофизики фотосинтеза. В данной публикации приводятся некоторые результаты натурных и лабораторных исследований, связанных с решением этой проблемы.

2. Механизмы световой регуляции выхода флуоресценции хлорофилла *in vivo*

Флуоресценция Хл «а» фотосинтезирующих организмов, в том числе водорослей, включает «постоянную» компоненту (Φ^c), квантовый выход которой практически не зависит от функционального состояния фотосинтетического аппарата, и «переменную» компоненту (Φ^v), выход которой определяется главным образом состоянием реакционных центров (РЦ) фотосистемы 2 (Φ C 2) и может меняться от нуля до двух-, трехкратного значений выхода Φ^c [6]. Φ^v возникает в результате рекомбинации первичного разделения зарядов в неактивных или закрытых РЦ Φ C 2. Суммарный квантовый выход флуоресценции ($\Phi^c + \Phi^v$) определяется эффективностью совместного действия фотохимического и нефотохимического тушения флуоресценции Хл «*a*» [6].

В идеальном случае, если все РЦ ФС 2 открыты, переменная флуоресценция не возникает и энергия экситонов, попадающих в РЦ ФС 2, эффективно используется для фотосинтеза. Выход флуоресценции Хл «а», определяемый лишь ее постоянной компонентой, при этом минимален, т. е. действует механизм фотохимического тушения. Воздействие различных неблагоприятных факторов, таких как недостаток минерального питания, присутствие гербицидов, токсикантов и др., приводит к появлению закрытых или неактивных РЦ ФС 2, в результате чего снижается эффективность фотохимического тушения, и выход флуоресценции может увеличиться в несколько раз за счет добавления переменной [6] и некоторого увеличения постоянной компоненты [7]. Стационарное освещение, как правило, приводит к усилению нефотохимического тушения флуоресценции. Механизмы такого тушения могут быть различными — это изменение рН и концентрации катионов внутри тилакоидов при энергизации хлоропластов (энергозависимое тушение) [8—10], фотоингибирование первичных стадий фотосинтеза [6, 11], приводящее к инактивации РЦ ФС 2 и увеличению скорости безызлучательной рекомбинации зарядов, фотофосфорилирование отдельных полипентидов светособирающего комплекса ФС 2 [6], спилловер [6], а также фотодеструкция пигментов и липидов [12].

В интактных клетках при нормальных условиях спилловер и фотофосфорилирование проявляются слабо и практически не влияют на эффективность флуоресценции Хл «а» [6]. Энергозависимое тушение снижает выход переменной компоненты флуоресценции и проявляется при освещенностях 2—20 клк [8—9]. При больших освещенностях (20— 100 клк) развивается фотоингибирование фотосинтеза, также сопровождающееся уменьшением выхода переменной флуоресценции [11]. Фотодеструкция, приводящая к тушению и постоянной компоненты флуоресценции, может наблюдаться при длительном (более часа) освещении клеток сильным светом (>10² клк).

Характерное время, за которое развиваются фотоингибирование и энергозависимое тушение, — 3-10 мин [6, 8—11]. Оба этих процесса являются обратимыми: при помещении водорослей, адаптированных к яркому свету (2—100 клк), в условия слабой освещенности (0,05—0,1 клк) происходит постепенное восстановление высокого темнового уровня интенсивности флуоресценции Хл «а». В случае энергозависимого тушения время восстановления составляет 2—5 мин [8, 9], при фотоингибировании, как правило, 20—60 мин [11].

Для определения начального (Φ^0) и максимального (Φ^{\max}) уровней интенсивности флуоресценции Хл «а» фитопланктона in situ в натурных условиях применялась лазерная методика [3, 4], которая является модификацией используемого в лабораторных условиях лампового двухимпульсного метода [13] и позволяет дистанционно, B TOM числе с борта движущегося носителя (судна, самолета, вертолета). проводить измерения. Автоматическая лидарная система [3, 4] на основе двух импульсных YAG:Nd³⁺-лазеров и оптического многоканального анализатора монтировалась в лаборатории научно-исследовательского судна. Поскольку, как следует из теоретических оценок и эксперимента, около 80% вклада в регистрируемый лидаром сигнал формируется в приповерхностном слое воды толщиной 2-3 м, приведенные ниже данные относятся к процессам именно в этом слое. В оптическую схему лидара (рис. 1) был введен канал измерения парамет-

Рис. 1. Блок-схема лидара-флуориметра для измерений интенсивности флуоресценции и эффективности первичных стадий фотосинтеза в пробах фитопланктона и дистанционно. 1, 2 — активирующий и зондирующий YAG:Nd — лазеры, 3 — генератор высоковольтных импульсов, отпирающих приемник оптического многоканального анализатора (ОМА), 4 — полихроматор и детектор ОМА, 5, 6 — сменные зеркала, 7 — поворотное зеркало. 9 — объективы, 10 — кювета с пробой фитопланктона, 11 консоль и монитор ОМА, 12 забортная вода, 13 -- компьютер, 14 — интерфейс, 15 — принтер



ров флуоресценции проб воды, который обеспечивал попадание лазерных импульсов в дно стеклянной кюветы с пробой и регистрацию спектра эхо-сигнала по 90-градусной схеме. На базе этого канала был собран лазерный флуориметр для измерений на чистых культурах водорослей в лабораторных условиях. При измерении интенсивности флуоресценции использовалась внутренняя калибровка по интенсивности параллельно измеряемого сигнала комбинационного рассеяния воды (метод «внутреннего репера» [2, 14]), что дало возможность дистанционных измерений.

При этом в качестве количественной меры интенсивности флуоресценции использовалась величина флуоресцентного параметра Φ , равного отношению интенсивности флуоресценции к интенсивности комбинационного рассеяния воды [2]. Необходимый уровень подсветки пробы воды обеспечивался с помощью диапроектора и контролировался по показаниям люксометра.

4. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены кривые суточного ритма интенсивности исходного (Φ^0 , рис. 2, *a*) и максимального (Φ^{max} , рис. 2, *б*) уровней флуоресценции Хл «*a*» фитопланктона в приповерхностном слое воды, из-



Рис. 2. Кривые суточного ритма начального (Φ^0) и максимального (Φ^{max}) уровней интенсивности флуоресценции фитопланктона и эффективности первичных стадий фотосинтсза (η), измеренные с применением дистанционной двухимпульсной методики в Тирренском море в апреле 1991 года. Штриховой линией показаны изменения освещенности I

меренные *in situ* дистанционно с борта судна с применением двухимпульсной лазерной методики [3, 4] на трехсуточной станции в Тирренском море в апреле 1991 г. На рис. 2, в приведена рассчитанная по этим данным суточная зависимость относительного выхода переменной флуоресценции $\eta = (\Phi^{max} - \Phi^0) / \Phi^{max}$, характеризующая вариации эффективности первичных стадий фотосинтеза в клетках водорослей [6]. Штриховой линией изображены измерявшиеся параллельно изменения естественной освещенности на поверхности воды. Приведенные данные показывают, что величины Φ^0 , Φ^{max} и η испытывали квазипериодические изменения с суточным периодом, меняясь в противофазе по сравнению с изменениями освещенности, причем форма этих кривых имеет сложную структуру.

В темное время суток (от 8 ч вечера до 6 ч утра) величина исходного уровня флуоресценции Φ^0 слабо варьировалась в пределах 0,15—0,17. На рассвете, при увеличении освещенности до 1—2 клк, значения Φ^0 возрастали в 1,2—1,5 раза, а затем, по мере дальнейшего увеличения освещенности, резко уменьшались, достигая минимального «дневного» значения, которое в данном случае оказалось на 30% меньше «темнового». После полудня, пока освещенность, уменьшаясь, превыщала 20—25 клк, величина Φ^0 сохранялась на минимальном уровне и лишь при дальнейшем падении освещенности в вечернее время начинала возрастать. На заходе (около 20 ч), когда освещенность составляла 1—2 клк, наблюдалось резкое (в 1,5 раза) возрастание Φ^0 , а затем, при дальнейшем уменьшении освещенности, — спад с выходом на стационарный темновой уровень.

Сравнение рис. 2, *a* и 2, *б* показывает, что во время суточных изменений величины Φ^{\max} максимального уровня флуоресценции Хл «*a*», измеряемого при искусственно закрытых с помощью активирующего лазерного импульса РЦ ФС 2 [4], наблюдались те же особенности, что и для величины Φ^0 , отличия состояли лишь в большем размахе вариаций Φ^{\max} . Отметим, что дневные стационарные значения Φ^{\max} и Φ^0 совпадали, темновые же величины Φ^{\max} в 1,5—2 раза превышали дневные.

Как следствие величина относительного выхода переменной флуоресценцин $\eta = (\Phi^{max} - \Phi^0)/\Phi^{max}$ (рис. 2, *в*) также достигала в темное время суток максимальных значений $\eta_d = 0, 4 - 0, 5$, что соответствовало хорошему функциональному состоянию клеток, когда 60—75% РЦ ФС2 активны. В полуденные часы, если освещенность превышала 40 клк, значения η падали до нуля, индицируя минимальный уровень эффективности фотосинтеза фитопланктона в приповерхностном слое воды.

Совместный анализ приведенных на рис. 2 зависимостей показывает, что суточные изменения Φ^0 , Φ^{max} и η в большинстве случаев следовали за изменениями освещенности *I*. Это свидетельствует о том, что первопричиной суточной динамики флуоресценции фитопланктона в приповерхностном слое воды были именно вариации естественной освещенности в течение дня. Кривые суточного ритма, измерявшиеся нами на других акваториях (Атлантика, Черное море, Антарктика), качественно соответствовали приведенным на рис. 2, отличаясь лишь амплитудой изменений.

С целью выяснения вклада фотоингибирования и энергозависимого тушения в регуляцию выхода флуоресценции Хл «a» in situ мы проводили измерения динамики восстановления при слабой освещенности (0,05—0,1 клк) темнового уровня интенсивности флуоресценции фитопланктона в пробах морской воды, отобранных из приповерхностного слоя при различных значениях освещенности. Значения темнового уровня относительного выхода переменной флуоресценции в точках отбора проб составляли от 0,2 до 0,7.

На рис. 3 (кривая 4) показана типичная зависимость $\Phi^0(t)$, измеренная для пробы нативного фитопланктона, отобранной днем и помещенной в условия слабой освещенности. По мере адаптации интенсивность флуоресценции постепенно возрастала до стационарного темно-

вого значения, характерного для ночных измерений *in situ*. В случае, если освещенность приповерхностного слоя воды составляла в момент отбора пробы 30—100 клк, время достижения высокого стационарного уровня интенсивности флуоресценции варьировалось в диапазоне 30— 60 мин, увеличиваясь для проб с пониженными значениями η.



Рис. 3. Динамика восстановления интенсивности флуоресценции фитопланктона после фотоингибирования сильным светом: 1, 2 — для диатомовых водорослей Nilzschia sp. при максимальном истощении ресурсов минерального питания (уровни Φ^{max} и Φ^0 соответственно); 3, 5 — Nilzschia sp. на логарифмической стадии роста (уровни Φ^{max} и Φ^0 соответственно); 4 — для пробы нативного фитопланктона, отобранной днем из приловерхностного слоя воды



Рис. 4. Кривые суточного ритма интенсивности флуоресценции (Φ^0) , измеренные дистанционно в Черном море в апреле 1988 г. Штриховой линией показаны изменения естественной освещенности

Специально проведенные лабораторные эксперименты с различными культурами морских водорослей по изучению влияния фотоингибирования на флуоресценцию Хл «а» показали, что время восстановления интенсивности флуоресценции после фотоингибирования сильным светом (100—150 клк) составляло 20—40 мин для клеток в хорошем функциональном состоянии (кривые 3, 5 на рис. 3) и увеличивалось до 1—2 ч при ухудшении функционального состояния ФС 2, вызванном недостатком минерального питания в среде обитания водорослей (кривые 1, 2 на рис. 3).

Во всех перечисленных случаях восстановления флуоресценции при слабой освещенности не наблюдалось в присутствии хлорамфеникола, который блокирует синтез белка на рибосомах хлоропластов. Между тем известно [6], что фотоингибирование сопровождается разрушением гербицидосвязывающего белка D1 массой 32 кДа, входящего в состав РЦ ФС 2, а его восстановление после фотоингибирования происходит на слабом свету только при нормальном синтезе этого белка в клетке.

Этот результат, а также полученные нами характерные значения времени восстановления темнового уровня флуоресценции позволяют сделать вывод о том, что уменьшение квантового выхода флуоресценции нативного фитопланктона в приповерхностном слое воды, наблю-

даемое днем, когда освещенность меняется в диапазоне 30—100 клк, обусловлено именно фотоингибированием первичных стадий фотосинтеза.

Сравнение приведенных на рис. З кривых восстановления темнового уровня флуоресценции после фотоингибирования показывает, что с ухудшением функционального состояния фотосинтетического аппарата водорослей время восстановления увеличивается. В случае, если доминирующим механизмом регуляции выхода флуоресценции в дневное время является фотоингибирование, это должно приводить к появлению характерной задержки подъема уровня флуоресценции $Xл \ll a$ » при уменьшении освещенности поверхности в послеполуденное время. Величина задержки, как следует из результатов, приведенных на рис. 3, может варьироваться от 30 мин до 1—2 ч в зависимости от функционального состояния $\Phi C 2$. Это явление неоднократно наблюдалось в натурных условиях.

На рис. 4 приведены зависимости $\Phi^0(t)$ и I(t), полученные в ходе дистанционных измерений in situ с борта судна весной 1988 г. в Черном море на стадии деградации цветения диатомовых водорослей Nitzschia sp. (измерения выполнялись при участии научного сотрудника физического факультета МГУ А. А. Демидова). Темновое значение относительного выхода переменной флуоресценции па оказалось при этом равным 0,1, что соответствует ситуации, когда 85% РЦ ФС 2 были неактивными. При этом, как показывает сравнение кривых, величина запаздывания послеполуденного подъема выхода флуоресценции $\Phi^0(t)$ при уменьшении освещенности составляла около 2 ч. В то же время величина задержки начала восстановления темнового уровня для приведенной на рис. 2 зависимости $\Phi^0(t)$ не превышала 30 мин, что объясняется хорошим состоянием фотосинтетического аппарата водорослей (п_d=0,5, 75% РЦ ФС 2 активны) в данном случае. Эти результаты также свидетельствуют о доминирующей роли фотоингибирования в регуляции квантового выхода флуоресценции Хл «a» in situ при высоких уровнях освещенности в дневное время.

В утренние и вечерние часы, когда освещенность приповерхностного слоя составляла 5—20 клк, измерения динамики восстановления темнового уровня флуоресценции Хл «а» при адаптации к слабому свету показали, что время восстановления не превышало 3—5 мин. В этом случае при немонотонных изменениях освещенности (см. рис. 2, а) изменения выхода флуоресценции также были немонотонны и противоположны по фазе вариациям освещенности. При этом запаздывающего на 2—3 ч восстановления флуоресценции при быстром снижении освещенности, характерного для больших уровней освещенности, не наблюдалось даже для водорослей с невысокими значениями η . Эти факты свидетельствуют в пользу того, что при уровнях освещенности порядка 5—20 клк регуляция величины квантового выхода флуоресценции Хл «а» in situ осуществляется за счет действия механизма энергозависимого тушения.

При длительном (более 1 ч) воздействии яркого солнечного света флуоресценция Хл «а» может снижаться и за счет фотодеструкции пигментов (в том числе Хл «а») и липидов тилакоидных мембран [12]. Возможно, этим объясняется некоторое уменьшение интенсивности флуоресценции Φ^0 и Φ^{max} на рис. 2, а и 2, б при увеличении освещенности до 100 клк в полдень третьего дня измерений. Однако, как показали данные натурных измерений в Северо-Западной Атлантике (35—50° с. ш.), этого не происходило даже при максимальной солнечной освещенности в приповерхностном слое океана, достигавшей 100120 клк. Тем не менее такая ситуация возможна в тропической зоне океана, если отсутствует вертикальное перемешивание подповерхностных слоев. Проявлением фотодеструкции, возможно, объясняется тот факт, что в экваториальной зоне океана наблюдался [1] суточный ритм флуоресценции приповерхностного фитопланктона с глубиной модуляции (отношение максимальной интенсивности флуоресценции к минимальной) до 5—8.

На основании проведенного анализа можно дать следующую интерпретацию наблюдавшимся (см. рис. 2, а) суточным изменениям интенсивности начального уровня флуоресценции Ф⁰ Хл «а» in situ. В темное время суток (с 8 ч вечера до 5 ч утра) интенсивность флуоресценции определялась величиной темнового выхода, определяемого суммой вкладов постоянной и рекомбинационной компонент. Величина относительного вклада последней определяется соотношением активных и неактивных РЦ ФС 2, зависящим в первую очередь от обеспечения клеток минеральным питанием [6, 7]. Быстрое увеличение Ф⁰ на рассвете с ростом освещенности до 1 клк было, вероятно, обусловлено динамическим увеличением доли закрытых под действием света реакционных центров ФС 2 и соответствующим ростом вклада переменной компоненты флуоресценции. По мере дальнейшего увеличения освещенности (2-5 клк и более) Ф⁰ начинало уменьщаться за счет усиления светоиндуцированного тушения флуоресценции — энергозависимого тушения и фотоингибирования. При этом уменьшалась и величина максимального уровня флуоресценции Ф^{тах} (рис. 2, б), а также относи- $\eta = (\Phi^{\max} - \Phi^0) / \Phi^{\max}$ выхода переменной флуоресценции тельного (рис. 2, в), что свидетельствовало о светоиндуцированном подавлении фотосинтеза в приповерхностном слое воды. При освещенности выше 40—50 клк значения Ф^{тах} совпадали со значениями параллельно определяемого начального уровня флуоресценции Ф°, а величина n снижалась до нуля. После полудня, с уменьшением освещенности, снижалось влияние фотоингибирования и энергозависимого тушения и происходило постепенное увеличение интенсивности флуоресценции (как Ф⁰, так и Φ^{\max}), сопровождаемое соответствующим ростом эффективности фотосинтеза (возрастание η). Резкий подъем Φ^0 на закате (при освещенности около 1 клк) объясняется в рамках принятой модели прекращением действия тушащих флуоресценцию механизмов и светоиндуцированным закрыванием части РЦ ФС 2. Дальнейшее быстрое падение освещенности приводит к установлению темновых уровней Φ^0 , Φ^{\max} и η .

В заключение авторы благодарят проф. В. В. Фадеева и д-ра биол. наук П. С. Венедиктова за полезные обсуждения, а канд. биол. наук Л. В. Ильяш — за предоставление чистых культур водорослей.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Карабашев Г. С. Флюоресценция в океане. Л., 1987. [2] Демидов А. А., Лапшенкова Т. В., Фадеев В. В. и др.//Метеорология и гидрология. 1988. № 6. С. 62. [3] Сhekalyuk А. М., Gorbunov М. Yu.//Proc. of 12th Asian Conf. on Remote Sensing. Singapore, Oct. 30 — Nov. 5, 1991. Р. Q-13-1. [4] Горбунов М. Ю., Фадеев В. В., Чекалюк А. М.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1991. 32, № 6. С. 63. [5] Кіеfег D. А.//Матіпе Віоl. 1973. 23, N 1. Р. 39. [6] Рубин А. Б., Кононенко А. А., Пащенко В. З. и др.//Итоги науки и техники. Сер. Биофизика. М., 1987. 22. [7] Горбунов М. Ю., Фадеев В. В., Чекалюк А. М.//Вестн. Моск. ун-та Физ. Астрон. 1992. 33, № 4. С. 53. [8] Кгаизе G. Н., Vernotte С., Briantais J.-M.//Biochim. et Biophys. Acta. 1982. 679, № 1. Р. 111. [9] Кгаиse G. H., Weis E.//Photosyn. Res. 1984. 5, № 2. Р. 139. [10] Bria/ntais J.-M., Vernotte C., Krause G. H.//Biochim. et Biophys. Acta. 1979. 548, № 2. Р. 128. [11] Роwles S. В.//Апп. Rev. Plant Physiol. 1984. 35. P. 15. [12] Мерзляк М. Н., Погосян С. И.//Биологические науки. 1986. № 3.

56

С. 8. [13] Faikowski P. G., Wyman K. D., Ley A. C., Mauzerall D. C.//Biochim. et Biophys. Acta. 1986. **849**, № 2. Р. 183. [14] Клышко Д. Н., Фадеев В. В. //ДАН СССР. 1978. **238**, № 2. С. 320.

Поступила в редакцию 31.01.92

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1992. Т. 33, № 6

УДК 535.417

ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ПОТЕРЬ В СЛОЯХ ТОНКОСЛОЙНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СТРУКТУР НА ИХ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А. В. Козарь, Е. В. Путрина (кафедра радиофизики)

Проведен анализ влияния малых потерь в слоях тонкослойной интерференционной структуры (ТИС) на ее оптические свойства (ТИС содержит в периоде два слоя одинаковой оптической толщины). Получены аналитические соотношения, позволяющие определять в зависимости от величины потерь возможные значения показателя преломления согласуемой среды и длины волны, на которой происходит согласование. Показано, что при большом числе периодов ТИС эти характеристики не зависят от числа периодов и определяются только величиной удельных потерь.

Рассмотрим влияние малых потерь в слоях на характеристики тонкослойных интерференционных структур (ТИС) — согласующих систем с характерными оптическими и структурными свойствами, к основным из которых можно отнести инвариантность их амплитудных характеристик и суммарной оптической толщины относительно числа слоев в них и возможность синтеза структур такого класса с толщинами слоев, существенно меньшими четвертьволновых [1, 2].

Пусть падение волны перпендикулярно плоскости слоев ТИС и она не ограничена в плоскости, перпендикулярной направлению ее распространения.

В случае наличия потерь в слоях правомерно [3] воспользоваться моделью «диэлектрик с потерями», тогда для комплексной диэлектрической проницаемости в нашем случае можно записать

$$\widehat{\varepsilon} = \varepsilon + j - \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_{\alpha}},$$

где є — относительная диэлектрическая проницаемость среды, σ — ее удельная проводимость, ω — циклическая частота распространяющейся в среде волны, ϵ_0 — универсальная диэлектрическая постоянная и соответственно для комплексного показателя преломления можно записать

$$\binom{n'}{\kappa} = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon^2 + \Sigma^2 \pm \varepsilon}}{2}},$$

где $(n'+j\varkappa)^2 \equiv (\widehat{n})^2 = \widehat{\varepsilon} = \varepsilon + j\Sigma.$

Для аналитических расчетов воспользуемся матричной и импедансной методиками [3, 4].

В случае двухслойной ТИС с помощью метода импедансных характеристик с учетом 1-го порядка малости по Σ (и соответственно по \varkappa) можно получить соотношения для определения нового значения согласующей способности структуры и смещения длин волн, на которых происходит согласование (под согласующей способностью структу-