

# Радиофизические дистанционные наблюдения эволюции плёнки фитопланктона, образованной потоком всплывающих газовых пузырьков

Е.И. Скворцов, М.Д. Раев, В.А. Силкин

*Институт космических исследований РАН  
117997 Москва, Профсоюзная, 84/32  
E-mail: jskvor@iki.rssi.ru*

В лабораторных условиях исследованы связи радиолокационных контрастов и сдвигов доплеровских частот отражённых микроволновых сигналов 8-мм диапазона и физических параметров плёнок в зависимости от видовой структуры и концентрации биомассы фитопланктона. Приведены результаты экспериментальных исследований процессов формирования и развития плёнок, образованных на водной поверхности клетками фитопланктона под действием всплывающих газовых пузырьков малых размеров (диаметр менее 1 мм).

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, фитопланктон, воздушные пузырьки, радиолокационный контраст.

## Введение

Выявление характерных признаков собственного и рассеянного микроволнового излучения плёнок на морской поверхности, образованных микроорганизмами, и отличающих их от плёнок поверхностно активных веществ (ПАВ) и нефтяных плёнок, представляет важную экологическую задачу. Решение этой задачи позволит разработать модели и алгоритмы, позволяющие, в частности, отличать на радиолокационных снимках, сделанных из космоса, слики, образованные несанкционированным сбросом нефтепродуктов, от сликов естественного органического происхождения. Одним из физических механизмов образования органической плёнки является вынос на морскую поверхность клеток фитопланктона потоком газовых пузырьков, в большом количестве образующихся при прохождении крупнотоннажных судов. Принципиальная возможность образования таких плёнок с концентрацией биомассы, достаточной для заметного гашения гравитационно-капиллярных волн, и выглаженных полос-сликов была выявлена в ходе предварительных экспериментальных исследований в ИКИ РАН и ЮО ИО РАН (Латшин, 1999; Скворцов и др., 2010). Данная работа является логическим продолжением этих исследований. В ходе проведённых экспериментов получены новые данные о количественных связях амплитудных и частотных характеристик микроволновых сигналов обратного рассеяния с биофизическими параметрами органических плёнок, образованных при выносе на водную поверхность потоком мелких газовых пузырьков микроводорослей фитопланктона.

## Методика эксперимента

Лабораторная установка, используемая в эксперименте, в основном аналогична описанной в работе (Скворцов и др., 2010). Для получения большего количества пузырьков и более равномерного распределения их по объёму ванны количество генераторов пузырьков

было увеличено до четырёх. Размеры основной массы генерируемых воздушных пузырьков находились в пределах 0,1...1 мм. Для возбуждения ряби на водной поверхности использовался вентилятор, создающий воздушный поток с постоянной скоростью 3 м/с. В ходе экспериментов на двух поляризациях измерялся радиолокационный контраст (отношение мощностей сигналов, отражённых от чистой водной поверхности и поверхности, покрытой плёнкой фитопланктона) и сдвиг доплеровских частот в зависимости от концентрации биомассы и её видового состава. Все измерения производились на угле зондирования 35°.

Измерения коэффициента поверхностного натяжения (КПН) плёнок фитопланктона на водной поверхности выполнялись методом капиллярных волн Релея на специально созданной установке. Точность измерений находилась в пределах 0,3...0,4 %.

Контроль концентрации клеток фитопланктона проводился путем подсчёта (под микроскопом) числа клеток водорослей в счётной камере Ножотта объёмом 0,05 мл.

В пробе учитывались водоросли всех систематических и размерных групп за исключением фракции пикопланктона (размеры 1...2 мкм), вклад которых в общую биомассу не превышал 1 %. Зная удельный вес клеток, средний объём и численность клеток каждого вида, определяли концентрацию биомассы в приповерхностном слое воды.

В экспериментах использовались как живые смешанные культуры водорослей фитопланктона, в которых доминирующими видами были диатомовые водоросли, так и мёртвое органическое вещество — детрит. Интерес к детриту объясняется тем, что в органических взвешях в открытом море его доля составляет 80...99 % от общей массы после «цветения» фитопланктона. Для экспериментов детрит был получен при длительном содержании культуры фитопланктона с постоянным добавлением элементов питания. Он представлял собой хлопья отмершей биомассы с незначительным включением живых клеток. Пересчёт сырой биомассы в углеродные единицы производили по формулам, учитывающим систематическую принадлежность водорослей (*Menden-Deuer, Lessard, 2000*).

В экспериментах с плёнками, образованными продуктами жизнедеятельности фитопланктона, клетки отфильтровывались с помощью ядерных фильтров с размером пор 1 мкм.

Полученную культуру с высокой концентрацией биомассы добавляли в экспериментальную ёмкость, после чего вода тщательно перемешивалась. Затем измерялась концентрация биомассы в приповерхностном слое и процентное соотношение видов фитопланктона. Далее включался компрессор и в течение 15 мин генерировался поток всплывающих пузырьков воздуха диаметром 0,1...1,0 мм, равномерно распределяющихся по всему объёму ванны. После выключения компрессора вновь измерялись концентрация клеток фитопланктона в приповерхностном слое и их видовой состав.

## Результаты экспериментов

На рис. 1 и 2 представлены зависимости радиолокационных контрастов и значений относительных сдвигов доплеровских частот отражённых сигналов от концентрации биомассы в приповерхностном водном слое. Измерения выполнены на вертикальной поляризации. Концентрация биомассы дана в углеродных единицах.

Динамика образования плёнки фитопланктона на водной поверхности зависела от структуры биомассы. При одинаковом расходе воздуха и распределении пузырьков по

размерам скорость образования плёнки состоящей из детрита была в 2...3 раза меньше, чем для живых микроводорослей. Во всех экспериментах с детритом после 15-минутного воздействия на водную массу потока всплывающих воздушных пузырьков наблюдалось увеличение концентрации биомассы с 0,021...0,024 до 0,050...0,066 мгС/л. Это составляет 20...30 % от общей массы детрита, внесённого в ванну. В то же время в экспериментах с живой культурой фитопланктона объём биомассы, выносимый газовыми пузырьками за то же время, достигал 60 %. Это объясняется тем, что детрит представлял собой хлопья биомассы, во много раз превышающие по размерам и весу отдельные микроводоросли живой культуры.

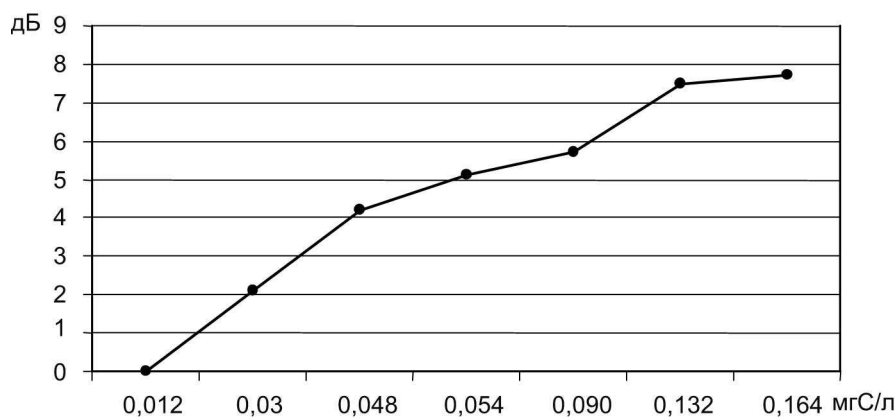


Рис. 1. Зависимость радиолокационных контрастов от концентрации фитопланктона

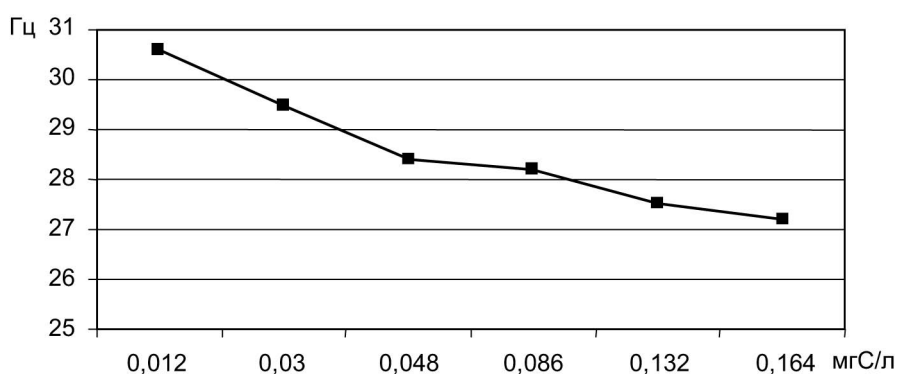


Рис. 2. Зависимость доплеровского сдвига частоты от концентрации фитопланктона

После прекращения действия пузырьков начиналось осаждение клеток фитопланктона. При скорости воздушного потока 3 м/с под действием дрейфового течения плёнка сносилась из области антенного пятна и интенсивность отражённого сигнала в течение 5...6 мин возвращалась к значениям, соответствующим чистой поверхности (Скворцов и др., 2010). Оценки скорости осаждения, сделанные по динамике изменения КПН в отсутствие воздушного потока, показали, что концентрация плёнки на водной поверхности достигала фоновых значений за 80...90 мин.

Для определения вклада в изменение физических характеристик поверхностного слоя непосредственно клеток фитопланктона и продуктов их жизнедеятельности были проведены измерения КРН образовавшихся на поверхности плёнок после окончания действия пузырьков воздуха.

На рис. 3 представлена зависимость КПН от концентрации биомассы в плёнке, образованной на поверхности живой культурой диатомовых микроводорослей. Каждая точка является средним значением для 5-6 измерений. При изменении концентрации от 0 до 0,062 мг/л уменьшение коэффициента поверхностного натяжения составило 10...12 %.

В то же время при обработке пузырьками раствора, содержащего только продукты жизнедеятельности микрофлоры (фильтрата), были получены неоднозначные результаты, и изменения КПН не превышали в основном 2...3 %.

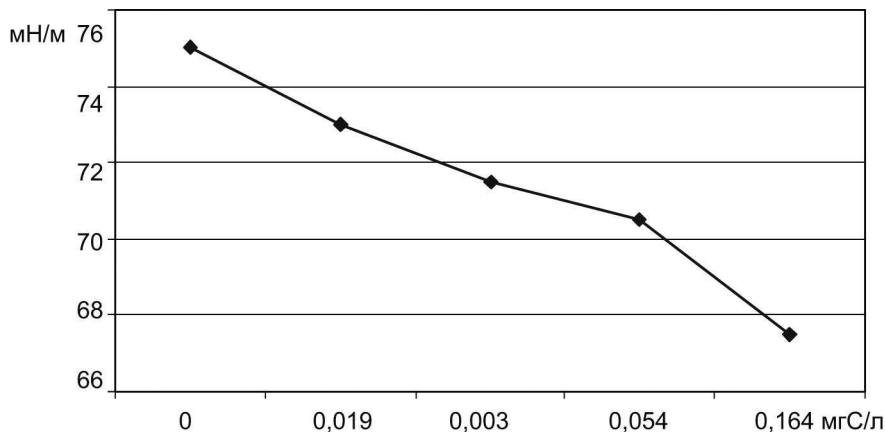


Рис. 3. Зависимость КПН от концентрации биомассы

### Обсуждение

Результаты экспериментов убедительно показывают, что как живые клетки фитопланктона, так и хлопья отмерших клеток могут быть ответственны за формирование slickов на поверхности моря. Основной механизм заключается в изменении физических характеристик микрослоя водной поверхности за счет органических структур, размеры которых превышают 10 мкм. Анализ рис. 1 и 2 дает основание полагать, что

1) существует минимальная концентрация биомассы, вызывающая гашение капиллярных волн и приводящая к формированию минимально различимого радиолокационного контраста, это количество биологических структур, которые прикрепляются к поверхностной плёнке; в наших исследованиях концентрация составила 0,01...0,012 мгС/л;

2) существует предельная величина биомассы клеток (или отмерших структур), выше которой не наблюдается изменение контраста, в наших экспериментах он находится в области 9...10 дБ при концентрации 0,16...0,18 мгС/л; эти максимальные величины зависят от структуры биомассы и физических характеристик пленки поверхности моря (наличие или отсутствие поверхностно активных веществ любого происхождения).

Несущественное изменение физических свойств пленки при добавлении фильтрата указывает на то, что количество органического вещества, выделяемого клетками фитопланктона, недостаточно для изменения характеристик или они являются слабыми поверхностно активными веществами. Действительно, клетки морского фитопланктона состоят в основном из белков и углеводов. Доля липидов (именно они обладают свойствами поверхностно активных веществ) низка и при отмирании части биомассы образованные вещества не вносят существенного вклада в изменение физических свойств поверхност-