О происхождении окраски морей и озер.

Вас. Шулейкин.

При первом взгляде на синюю поверхность моря, в ясный летний день, может возникнуть мысль, что окраска этой поверхности вызывается отражением голубого неба в воде. Однако нетрудно убедиться в том, что это не совсем так: для этого достаточно лишь сравнить, с одной стороны, насыщенный синий цвет Нордкапского течения, которое попадает в воды Полярного моря, и, с другой стороны, — бледный, зеленовато-серый цвет Азовского моря, над которым синеет яркое южное небо.

Очевидно, следовательно, что на окраску моря влияют какие-то внутренние причины, какие-то индивидуальные особенности.

Выяснением этих причин занимался целый ряд исследователей, начиная с Леонардо да-Винчи, особенно же обстоятельная экспериментальная работа была произведена десять лет тому назад германским физиком О. фон-Ауфзесс.

Изучая окраску Баварских озер, он пришел к заключению, что видимый цвет их вызывается какими-то красящими веществами, примешанными к воде и характерными для каждого озера.

Однако, как удалось показать автору настоящей заметки в 1921 г. [1]), подобное соображение приводит к неверным результатам, если, исходя из них, произвести количественное исследование.

Напротив, весьма просто и детально можно объяснить происхождение окраски морей и озер, если шаг за шагом проследить за распространением световых лучей, попадающих сверху в воду, а затем как-то направляемых в глаз наблюдателя.

Предположим, что на каждый квадратный сантиметр поверхности моря падает сверху некоторое количество световой энергии J_0 и что этот падающий свет совершенно белый.

Разобьем всю толщу морской воды на тонкие горизонтальные слои.

Так как вода обладает избирательной поглощательной способностью, то—при распространении света от слоя к слою—энергия лучей

---

[1]) Вас. Шулейкин. „О цветности моря". Известия Физич. Инст. М. Научн. Инст. II. 129. 1922.

будет отчасти непрерывно поглощаться, при чем сильнее всего будут поглощаться красные лучи, а слабее всего — фиолетовые и синие.

Чем глубже проникает свет, тем более интенсивную, синюю окраску принимает он. Но наблюдатель, смотрящий на море сверху, никогда не увидел бы этого синего света, если бы в слоях воды происходило одно лишь поглощение лучистой энергии и не было причин, заставляющих лучи света возвращаться обратно вверх.

В действительнести такая причина существует,—существует другой процесс, который имеет место в слоях воды, на-ряду с процессом избирательного поглощения. Причина эта — рассеяние света мельчайшими частицами, всегда присутствующими в морской воде в виде очень тонкой взвеси (сами молекулы воды тоже, разумеется, рассеивают свет, но эффект, вызываемый ими, ничтожен по сравнению с эффектом, вызванным другими, более активными частицами — скоплениями молекул газов, растворенных в воде, и др. Этого обстоятельства не учитывает, между прочим, недавно появившаяся теория происхождения окраски морей, предложенная калькуттским физиком Раманом (C. V. Raman, 1922).

Законы рассеяния света «мутными срединами» были тщательно изучены Стрёттом (лорд Рэлей), который показал (1871 и 1899), что количество световой энергии, рассеянной бесконечно-тонким слоем (dz) мутной среды прямо пропорционально интентенсивности падающего света J, толщине dz и обратно пропорционально четвертой степени длины волны соответствующего луча, т.-е.:

$$dJ = -\frac{a}{\lambda^4} \cdot J \cdot dz.$$

Здесь λ — длина волны, a — некоторый коэффициент, который мы в дальнейшем будем называть коэффициентом рассеяния; коэффициент этот зависит от концентрации и размеров взвешенных частиц[1]).

Полное ослабление света слоем толщиной dz нетрудно найти, сложив количество света рассеянного и поглощенного. Последнее не может быть выражено аналитически, но его можно представить в виде кривой (№ 1 на рисунке 1): по оси абсцисс отложены длины волн, а по оси ординат—соответствующие коэффициенты поглощения. Обозначим последние символом $f(\lambda)$.

Исследуя распространение света от слоя к слою, можно вычислить количество энергии, которая рассеивается вверх каждым бесконечно-тонким слоем, лежащим на некоторой глубине под поверхностью моря. Прежде чем такие отброшенные вверх лучи дойдут до поверхности и попадут в глаз наблюдателя, они должны вновь пройти сквозь более

---

[1]) Были попытки объяснить окраску морей одним лишь неодинаковым рассеянием лучей разных длин волн (как была объяснена самим лордом Рэлеем окраска небесного свода), но положительных результатов они не дали.

или менее толстый слой воды, но и это обстоятельство нетрудно учесть, если известны законы поглощения и рассеяния света в морской воде.

Разумеется, количество энергии, посланной кверху различными слоями, будет неодинаково: глубокие слои пошлют несравненно меньше ее, чем слои выше лежащие. Суммируя энергию, дошедшую снизу до поверхности моря, автор настоящей заметки получил окончательно следующее выражение:

$$J = J_0 \frac{\frac{1}{4}\frac{a}{\lambda^4}}{\frac{1}{4}\frac{a}{\lambda^4} + f(\lambda)} \quad . (1')$$

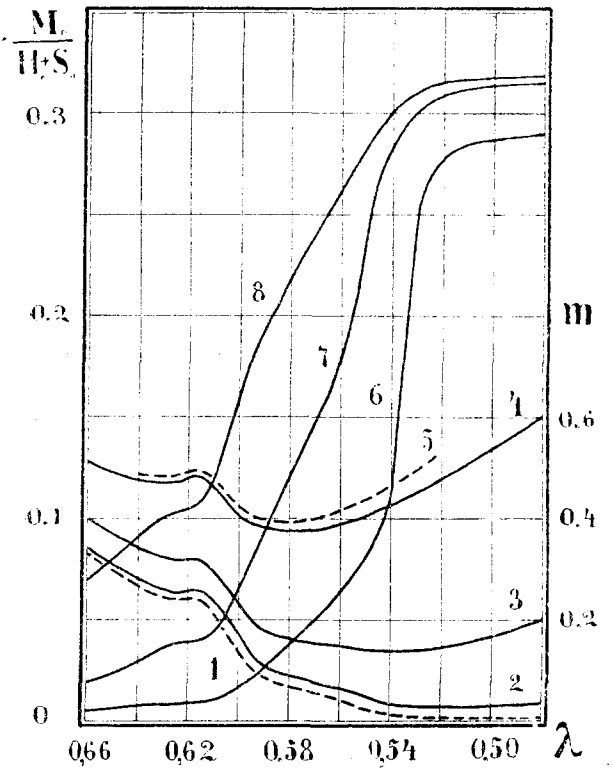

Рис. 1.

Буквой J обозначено здесь количество лучистой энергии, выходящей обратно вверх через единицу поверхности моря; все остальные обозначения сохраняют смысл, указанный выше.

Нетрудно видеть, что J будет меньше, чем J_0, и что уменьшение будет неодинаково для различных длин волн λ: так, лучи красные будут ослаблены значительно больше, чем синие.

Рассмотрим несколько ближе величины J_0 и J. Первая из них (поток энергии, пронизывающей единицу поверхности сверху вниз) может быть разбита на два слагаемых. В самом деле, если море освещается сверху: 1) солнечным диском и 2) небесным сводом, и если яркость освещения одним только солнцем равна S_0, а одним только небесным сводом — H_0, то очевидно, что $J_0 = S_0 + H_0$.

Что касается яркости освещения поверхности моря изнутри окрашенным светом, исходящим из глубин, то ее нетрудно связать с количеством энергии J, исходящим вверх через единицу поверхности.

Действительно, так как свет этот диффузный, то очевидно, что яркость освещения M_0 выражается так:

$$M_0 = \frac{J}{\pi}$$

Подставляя в уравнение (1′) вместо J_0 и J их выражения, найдем:

$$M_0 = \frac{S_0 + H_0}{\pi} \cdot \frac{\frac{1}{4}\frac{a}{\lambda^4}}{\frac{1}{4}\frac{a}{\lambda^4} + f(\lambda)}$$

или, иначе:

$$\frac{M_0}{S_0 + H_0} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\frac{1}{4}\frac{a}{\lambda^4}}{\frac{1}{4}\frac{a}{\lambda^4} + f(\lambda)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Нетрудно видеть, что полученное равенство позволяет вычислить спектр того внутреннего света, который сообщает морю его характерную окраску: для этого нужно только знать $f(\lambda)$ и a.

Значения $f(\lambda)$ для различных длин волн были получены целым рядом экспериментаторов. Мы заимствуем их из книжки О. фон-Ауфзесс «Die Physikalischen Eigenschaften der Seen» (рис. 1 кривая № 1).

Что касается значения a, то его также можно определить из опыта, находя коэффициент «абсорбции» света в морской воде. Нетрудно показать, что такой коэффициент абсорбции m на самом деле слагается из двух частей: одной, зависящей от поглощения света водою (в истинном смысле этого слова), и другой, зависящей от рассеяния света по закону лорда Рэлея. Именно:

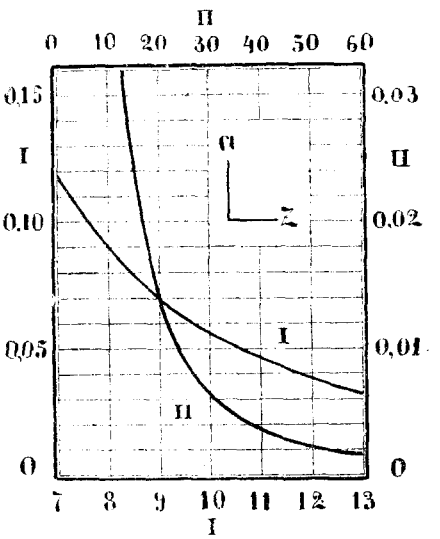

Рис. 2. (Глубины исчезновения выражены в метрах).

$$m = f(\lambda) + \frac{1}{2}\frac{a}{\lambda^4}.$$

Определяя m с помощью исследования проб воды, можно найти a (на рисунке 1 изображена, для примера, кривая m № 5, полученная Ауфзессом для воды Штаффельского озера и приписываемая им особому «красящему веществу», растворенному в воде). Но величину a можно приближенно определить и с помощью более простого приема: наблюдая глубину, на которой исчезает в воде так называемый «диск Секки». Можно показать, что связь между коэффициентом a и глубиной исчезновения диска Секки Z выражается кривой, изображенной на рисунке 2 [1]).

[1]) См. цитированную работу автора.

Глубины исчезновения диска Секки определялись всеми океанографическими экспедициями.

Поэтому есть основания полагать, что для вод трех типичных наших морей: Черного, Балтийского и Белого,—коэффициент a соответственно:

$$a = 0{,}004$$
$$a = 0{,}020$$
$$a = 0{,}070$$

Трем этим значениям a и соответствуют как раз кривые $m = f(\lambda) + \frac{1}{2}\frac{a}{\lambda^4}$, нанесенные на рисунок 1 под номерами 2, 3 и 4.

Подставляя значения a в формулу 1, найдем спектры внутреннего света, вызывающего окраску Черного моря (спектр № 6), Балтийского моря (спектр № 7) и Белого (спектр № 8).

Нетрудно видеть, что спектр Черного моря отвечает действительности: относительная яркость лучей в синей части спектра несравненно больше, чем во всех остальных; море отличается насыщенным темно-синим цветом. Очевидно также, что окраска Балтийского моря будет светлей и зеленей, чем окраска Черного, а окраска Белого будет еще более белесоватой и зеленоватой.

До сих пор мы предполагали, что частицы, взвешенные в воде, только рассеивают свет, не поглощая его.

На самом деле, в природных водах часто встречаются еще частицы другого рода — частицы, обладающие способностью поглощать свет и притом избирательно. Таковы, например, частицы взмученного измельченного грунта, планктон и проч.

Учитывая совместное действие частиц обоих родов, можно получить спектр внутреннего света в самом общем виде:

$$\frac{M_0}{S_0 + H_0} = \frac{1}{\pi} \frac{(1-\beta)\frac{1}{4}\frac{a}{\lambda^4} + \beta \cdot \frac{1}{2}\varphi(\lambda)}{(1-\beta)\frac{1}{4}\frac{a}{\lambda^4} + f(\lambda) + \beta\left[1 - \frac{1}{2}\varphi(\lambda)\right]} \quad . \; . \; . \; . \; (2)$$

Здесь β обозначает вероятность встречи светового луча (на пути в 1 метр) с частицей второго рода; $\varphi(\lambda)$ — коэффициент избирательного отражения для последних.

Вычисления по формуле (2) приводят к спектральным кривым, изображенным на рисунке 3.

Они соответствуют тому случаю, когда в воде взвешены частицы глинозема.

Кривая 9 отвечает небольшой концентрации последних ($\beta = 0{,}02$); видимый цвет воды, очевидно, зеленоватый.

Кривая 10 отвечает несколько большей концентрации ($\beta = 0{,}20$); цвет — совершенно зеленый.

Наконец, кривая 11 соответствует предельному случаю, когда $\beta = 1$, то-есть когда рассеянием света частицами первого рода можно пренебречь; видимый цвет здесь уже коричневый, такой, какой имеют горные речки, несущие большое количество частиц глинозема.

Итак, все нюансы окраски водоемов могут быть объяснены (и притом количественно), если проследить за рассеянием и поглощением света в воде.

Окраска эта зависит, следовательно, от оптических свойств воды данного моря или озера, но оптические свойства ее, очевидно, подвержены изменениям.

Особенно резкие изменения вносят частицы «второго рода», которые появляются в большом количестве, особенно после свежих ветров, когда с берегов и отмелей нередко тянутся в открытое море целые полосы воды, окрашенной в желто-зеленый или красноватый цвет (в зависимости от грунта); подобным же образом влияет и окрашенный планктон, временами появляющийся в очень больших количествах.

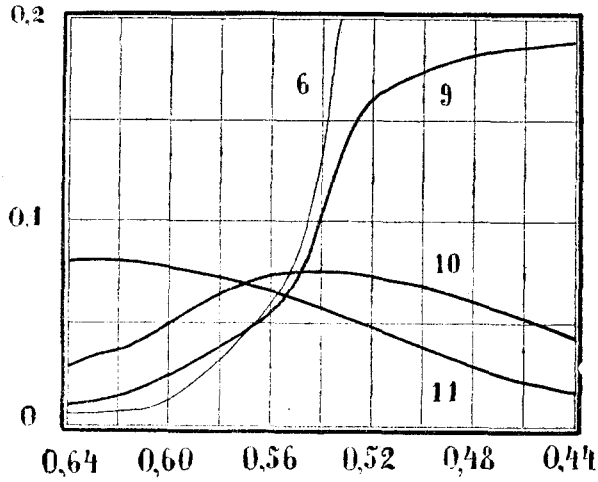

Рис. 3.

Но и число частиц «первого рода» тоже подвержено изменению; непостоянны, повидимому, и их размеры.

В самом деле, ведь в воде морей и озер, как известно, растворены газы, входящие в состав атмосферного воздуха; так, по данным Ю. М. Шокальского, один литр океанской воды (соленость $= 35^0/_{00}$), при нормальном давлении и при температуре 15^0 C поглощает 5,84 $см^3$ кислорода и 11,12 $см^3$ азота. При понижении температуры до 0^0, количество поглощенного кислорода увеличивается до 8,03 $см^3$, а количество азота—до 14,4 $см^3$; напротив, при повышении температуры воды до 30^0 количество кислорода падает до 4,5 $см^3$, а количество азота—до 9,26 $см^3$.

Приняв во внимание эти цифры, предположим, что та или иная причина вызывает местное нагревание холодной морской или озерной воды. Очевидно, что при этом часть растворенных газов должна выделиться, но процессу выделения газов в виде более или менее крупных пузырьков будет предшествовать процесс скопления газовых молекул в группы, число и размеры которых непрерывно возрастают с повышением температуры воды.

Вот эти-то группы молекул, повидимому, и являются теми частицами «первого рода», о которых упоминалось выше («группировка» газовых молекул может, разумеется, происходить даже и в том случае, если газы даже не насыщают воды при данной температуре).

Очевидно, стало быть, что при местном нагревании вод моря или озера, коэффициент рассеяния должен возрасти, а видимая окраска в этом месте сделается более белесоватой и зеленоватой.

И действительно, обитатели берегов озера Байкал наблюдают белесоватые пятна на поверхности его как раз в тех местах, где бьют горячие ключи.

Противоположный эффект имеет место в том случае, когда теплые воды испытывают местное охлаждение. При этом размеры и число молекулярных «скоплений» должны уменьшаться, уменьшая тем самым коэффициент рассеяния и увеличивая прозрачность вод. Последние будут в таких местах принимать более синюю, насыщенную окраску, которая и наблюдается, в действительности, хотя бы в Нордкапском течении, где теплые воды Гольфстрома вливаются в холодные воды полярных морей. Говоря о видимой окраске моря, мы до сих пор предполагали, что наблюдатель смотрит отвесно вниз—перпендикулярно к водной поверхности, так как только в этом случае он может наблюдать внутренний диффузный свет в его наиболее чистом виде.

В самом деле, как показал еще Френэль, при прохождении световых лучей через границу двух разнородных средин (например, воды и воздуха), часть лучей преломляясь входит во вторую среду, часть же отражается обратно в первую. Наибольшее количество лучистой энергии, выходящей во вторую среду, будет иметь место в том случае, когда лучи направлены нормально к пограничной поверхности. Но очевидно, что, кроме внутреннего света, наблюдатель видит еще отражение небесного свода в воде и этот отраженный свет будет иметь минимум яркости как раз при отвесном наблюдении.

Предположим теперь, что наблюдатель смотрит с борта корабля (или с отвесной скалы над очень глубоким местом) на гладкую поверхность моря, простирающуюся до горизонта. Очевидно, что угол с поверхностью воды, под которым он видит все более и более далекие ее части, будет все острее и острее; все меньше и меньше будет, поэтому, видимая яркость внутреннего света и, наоборот, все больше и больше яркость света отраженного.

Прямо внизу, под ногами, наблюдатель увидит насыщенно окрашенную поверхность, а дальше она будет все светлеть, приобретая к горизонту характерный для штиля белесоватый оттенок...

Базируясь на законах преломления и отражения света, нетрудно так же просто объяснить резкие изменения видимой окраски моря, во время волнения. Положим, что луч зрения встречает некоторый элемент взволнованной водной поверхности в точке O (рис. 4), составляя угол φ с нормалью.

Очевидно, что луч, попадающий в глаз наблюдателя, можно разложить на два составляющих луча: один из них (M) вышел, преломившись, из-под поверхности воды; другой (H) — отразился от элемента водной поверхности, упав на него по направлению H_0O. Как яркость преломленного света M, так и яркость отраженного света H можно вычислить по формулам Френэля, подставляя в них значения M_0 и H_0. Именно:

$$\left.\begin{aligned} M &= \frac{1}{2}\,\frac{\sin 2\varphi \,.\, \sin 2\Psi}{\sin^2(\varphi+\Psi)}\left[1+\frac{1}{\cos^2(\varphi-\Psi)}\right].M_0 \\ H &= \frac{1}{2}\,\frac{\sin^2(\varphi-\Psi)}{\sin^2(\varphi+\Psi)}\left[1+\frac{\cos^2(\varphi+\Psi)}{\cos^2(\varphi-\Psi)}\right].H_0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots (3)$$

По наблюдениям Бунзена, Роско, Пернтера и других, в ясные дни можно часто принимать $H_0 = S_0$; таким образом можно связать равенством (1) или (2) M_0 и H_0.

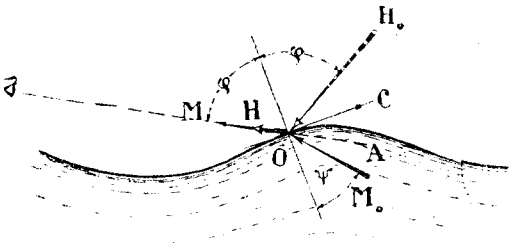

Рис. 4.

Нетрудно видеть, что тогда система уравнений (3) позволит найти относительную величину M и H для любых углов наклона волны. В последней системе уравнений независимым переменным является, очевидно, только один угол (например φ), так как другой угол связан с ним соотношением Декарта: $\frac{\sin\varphi}{\sin\Psi} = n = 1{,}32$ (для перехода луча из воды в воздух).

Изменения M и H можно представить очень наглядно на полярной диаграмме (см. рис. 5).

От полярной оси OA будем откладывать (против часовой стрелки) углы AOC, которые составляет луч зрения OA с касательной к волне в данной точке O.

Откладывая на радиусе векторе OC величину H, получим кривую I, выражающую видимую яркость отраженного света.

Откладывая же на нем величину M (в том же масштабе)—получим кривую II, выражающую видимую яркость внутреннего света в синей части спектра. Пользуясь уравнениями (1) или (2) или же непосредственно спектральными кривыми рисунков 1 и 3, можно построить такую же кривую для любых спектральных лучей, исходящих из глубин моря. Для примера, на диаграмму 5 нанесена еще одна из таких кривых (III), вычисленная для желто зеленой части спектра.

Полярная диаграмма (см. рис. 5) позволяет проследить за изменением окраски моря во время волнения.

Пусть наблюдатель стоит на берегу и смотрит на море под острым углом к горизонту. Если на море штиль, то вектор OC составляет очень малый угол с полярной осью OA. Радиус вектор (M) кривой II близок к нулю, а соответственный радиус-вектор (H) кривой I значительно превышает его, приближаясь к максимальной величине $OA = H_0$.

Цвет моря соответствует окраске небесного свода, обычно белесоватой.

Но стоит лишь на поверхности моря образоваться волнам (хотя бы небольшим), как угол AOC начнет возрастать, при чем вектор M будет быстро увеличиваться, вектор H резко уменьшаться; море начнет быстро синеть (если это Черное море) или же зеленеть (если это море Белое или Балтийское).

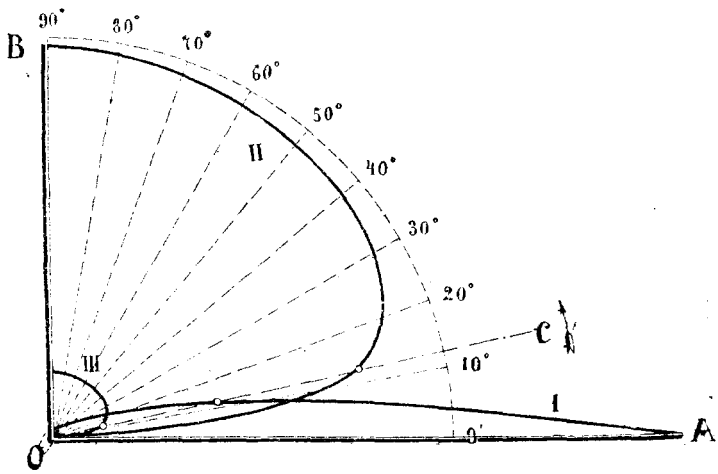

Рис. 5.

При построении диаграммы 5 предполагалось. что яркость освещения моря одним только небесным сводом равна яркости освещения одним только диском солнца:

$$H_0 = S'_0.$$

Но очевидно, что в действительности S'_0 может оказаться очень малой величиной, близкой к нулю, как это имеет место в том случае, когда диск солнца закрыт облаками.

При этом, в формуле (1) или (2) вместо $S_0 + H_0$ окажется только H_0 — окраска моря будет обусловлена окраской небесного свода, тем более, что вектор M, в большинстве случаев, будет мал по сравнению с вектором H (его относительная величина уменьшится приблизительно вдвое по сравнению с соответственной величиной в ясную погоду). Вот чем объясняется темный, свинцовый цвет моря в пасмурную погоду. Так же нетрудно объяснить и своеобразную, пеструю окраску,

которую принимает, например, Черное море после шторма, когда солнце местами проглядывает сквозь облака: там, где солнечные лучи непосредственно попадают в воду, они быстро рассеиваются крупными пузырьками воздуха, взвешенными в верхних слоях взволнованной воды; отбрасываясь последними кверху, они проходят через сравнительно небольшой слой воды и вызывают здесь желтовато-зеленую окраску поверхности волн; напротив, там, где облака загораживают прямые солнечные лучи,—наблюдатель видит синий внутренний свет, исходящий из глубин, по волнам бегут здесь насыщенно-синие «тени» облаков.

Та же диаграмма 5 позволяет объяснить и интенсивную окраску горных озер. В самом деле, горы, окружающие последние, как бы «отрезают» пояса небесного свода, лежащие близко к горизонту и отражающиеся в воде под острым углом. В озере отразятся, следовательно, лишь те зоны, которым отвечают большие углы AOC (диаграмма 5), но яркость отраженного цвета будет здесь невелика, и наблюдатель увидит окраску озера, вызванную, главным образом, «внутренним» светом.

Окраска эта будет или синяя, или зеленая — в зависимости от оптических свойств озерной воды (см. рис. 1—3).

Количественные выводы теории, изложенной выше, были автором настоящей заметки подвергнуты экспериментальной проверке.

Первоначально проверка была произведена в лабораторном масштабе, в биофизическом институте, — при чем обнаружилось полное согласие теории с опытом. В дополнение к тому, что было уже опубликовано в Известиях Физического Института[1]), приведем результат фотометрического наблюдения «модели» моря.

В водный раствор синей анилиновой краски «родулин» вливался спиртовый раствор канифоли, который давал в воде весьма тонкую коллоидальную взвесь.

Определяя экспериментально $f(\lambda)$ для раствора синей краски (заменяющей избирательное поглощение в толстом слое морской воды) и коэффициент рассеяния света тончайшими частицами канифоли (заменяющими частицы «1 рода» в морской воде), можно было вычислить спектр света, который исходит из ванночки с параллельными стеклянными стенками, если эта ванночка, наполненная раствором краски и коллоидальной взвесью,—рассматривается в отраженном свете. Вычисление, произведенное по формуле (1), приводит к кривой, изображенной на рисунке 6.

Непосредственное фотометрирование освещенной поверхности такой «модели моря» дало ряд точек, нанесенных на рис. 6. Как видно из рисунка, экспериментально полученные точки очень близко ложатся около теоретической кривой.

---

[1]) И. Ф. И. т. II. 129. 1922.

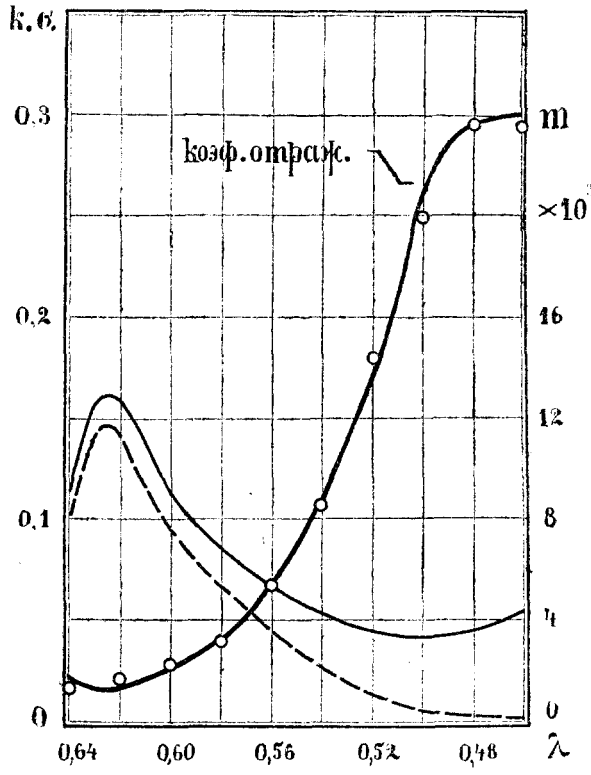

Рис.

Вполне удовлетворительные результаты получились и при проверке формулы (2), при чем роль частиц «2 рода» исполняли частицы охры, взвешенной в воде.

Окончательная проверка теории в природных условиях была выполнена минувшим летом 1922 года. Первые опыты производились в Черном море, близ Севастополя, на портовом катере «Ай-Фока» и дали результаты, согласные с теорией. К сожалению, благодаря свежей погоде и сильной качке катера, наблюдения были весьма затруднены, и не могло быть и речи о построении точной спектральной кривой.

В несравненно более благоприятных условиях удалось выполнить фотометрические измерения на борту гидрографического судна «Пахтусов», на котором я получил возможность работать, благодаря любезному содействию комитета Пловучего Морского Научного Института и начальника Гидрографического Управления северных морей П. П. Михайлова.

«Пахтусов» вышел из Архангельска в конце августа и совершил рейс к берегам полуострова Ямала: через Белое море, Баренцево море (севернее о. Колгуева), Югорский шар и Карское море (с заходом к северной оконечности о. Вайгача—в Карских Воротах).

Приводим результаты наблюдений на четырех из станций.

№ станции.	Положение станции.	Время.	Глубина исчезновения диска Секки Z	Коэффициент рассеяния a
1	Горло Белого моря $\varphi = 66° 43' N$ $\alpha = 41° 24' O$	9^h	8 mt.	0,09
2	Югорский Шар близ бухты Варнека.	15^h	5 „	0,23
4	Карские Ворота близ радио-станции.	10^h	12,15 „	0,035
5	Карское море (на больших глубинах) $\varphi = 69° 52' N$ $\alpha = 62° 45' O$	10^h	11 „	0,05

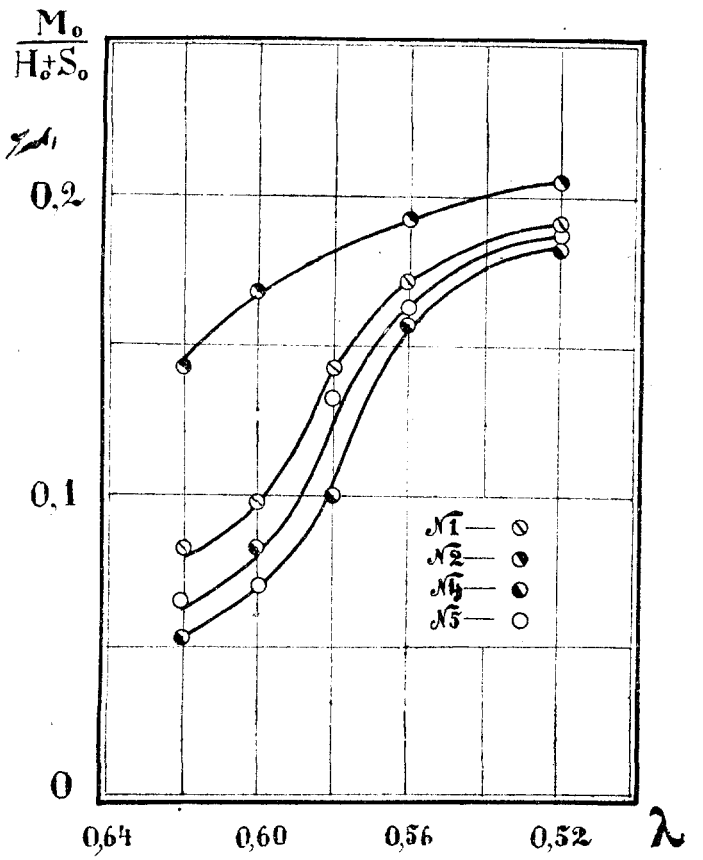

Рис. 7.

Спектральные кривые, полученные на этих станциях, изображены на рис. 7.

Как видим, ход их вполне соответствует теории. Замечается лишь разница в масштабе: абсолютная яркость «внутреннего» света оказывается меньше той, которую дает теория, но это уклонение объясняется крайне просто. В самом деле, ведь при выводе формул (1) и (2) предполагалось, что концентрация взвешенных частиц постоянна как в поверхностных, так и в глубоких слоях морской воды. В действительности это, разумеется, не так: рассеяние света, на различных глубинах, может быть различным—глубокие слои воды, по всей вероятности, более прозрачны, чем поверхностные. Такое предположение поддерживают также и наблюдения над окраской глубоководных растений, произведенные автором во время плавания на «Пахтусове», но на этих наблюдениях мы здесь останавливаться не можем.