

А. А. БУЗНИКОВ, Г. А. ИВАНЯН, член-корреспондент АН СССР К. Я. КОНДРАТЬЕВ,  
Д. В. ПОЗДНЯКОВ

### ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА ПОЛЯРИЗАЦИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ДИСТАНЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПЛЕНОК НЕФТИ НА ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ

В составе нефти, попавшей на поверхность моря, происходят изменения, связанные с испарением летучих компонентов, выпечлачиванием водорастворимых веществ, погружением тяжелых остатков на дно и др. (1). В результате на относительно спокойной водной поверхности (волнение 1—2 балла) образуется пленка, состоящая из нефтяных фракций, кипящих при температурах 350—450° С (2). Различие в оптических свойствах чистой морской воды и такой нефтяной пленки может быть использовано для целей дистанционного обнаружения последней (3).

Эксперимент был проведен на Каспийском море. Коэффициент преломления смеси интересующих нас фракций нефти Бакинского месторождения  $n \sim 1,5$  в интервале длин волн 400—700 нм, для воды соответственно  $n \sim 1,33$  (4, 5). Таким образом, ясно, что в видимой области спектра нефтяная пленка должна иметь более высокий коэффициент отражения  $r$ , чем чистая поверхность воды.

Вода и нефтяная пленка как диэлектрические поверхности поляризуют отраженное излучение. Величины нормальной  $r_n$  и параллельной  $r_{||}$  составляющих для рассматриваемого случая в зависимости от угла падения  $\Phi_0$  могут быть рассчитаны по формулам Френеля с учетом некоторых упрощающих обстоятельств:

а) толщина пленки позволяет не учитывать отражение от поверхности раздела нефть — вода,

б) коэффициент поглощения  $k$  для воды и нефтяной пленки пренебрежимо мал в сравнении с соответствующей величиной  $n$  (6, 7).

В таком случае

$$r_n = \frac{\sin^2(\Phi_1 - \Phi_0)}{\sin^2(\Phi_1 + \Phi_0)}, \quad r_{||} = \frac{\operatorname{tg}^2(\Phi_0 - \Phi_1)}{\operatorname{tg}^2(\Phi_0 + \Phi_1)},$$

где  $\Phi_1$  — угол преломления в отражающей среде с коэффициентом преломления  $n$ .

Из рис. 2, на котором представлены результаты расчета для  $\lambda = 486$  нм величин  $r_n^H - r_n^B$  и  $r_{||}^H - r_{||}^B$  (где  $r^H$  и  $r^B$  — коэффициенты отражения от нефтяной пленки и воды соответственно), видно, что величина  $r_n$  для нефтяной пленки при любых  $\Phi_0$  больше  $r_n$  для воды, в то время как параллельно поляризованная компонента  $r_{||}^H$  лишь незначительно превышает  $r_{||}^B$  (на 1—2%) при  $0 < \Phi_0 < 50^\circ$ , а при  $\Phi_0 > 70^\circ$  значения  $r_n^H \ll r_n^B$ . Отсюда следует, что при обнаружении нефтяной пленки на поверхности воды по отражению наиболее значительный и устойчивый контраст следует ожидать при регистрации только н о р м а л ь н о й составляющей поляризации. При этом оптимальные углы визирования оказываются в интервале 40—50°, поскольку при этом одновременно обеспечиваются как достаточно высокий уровень энергии отраженного излучения и контраста нефть — вода, так и минимум «мешающего» влияния параллельно поляризованной компоненты  $r_{||}^B$ .

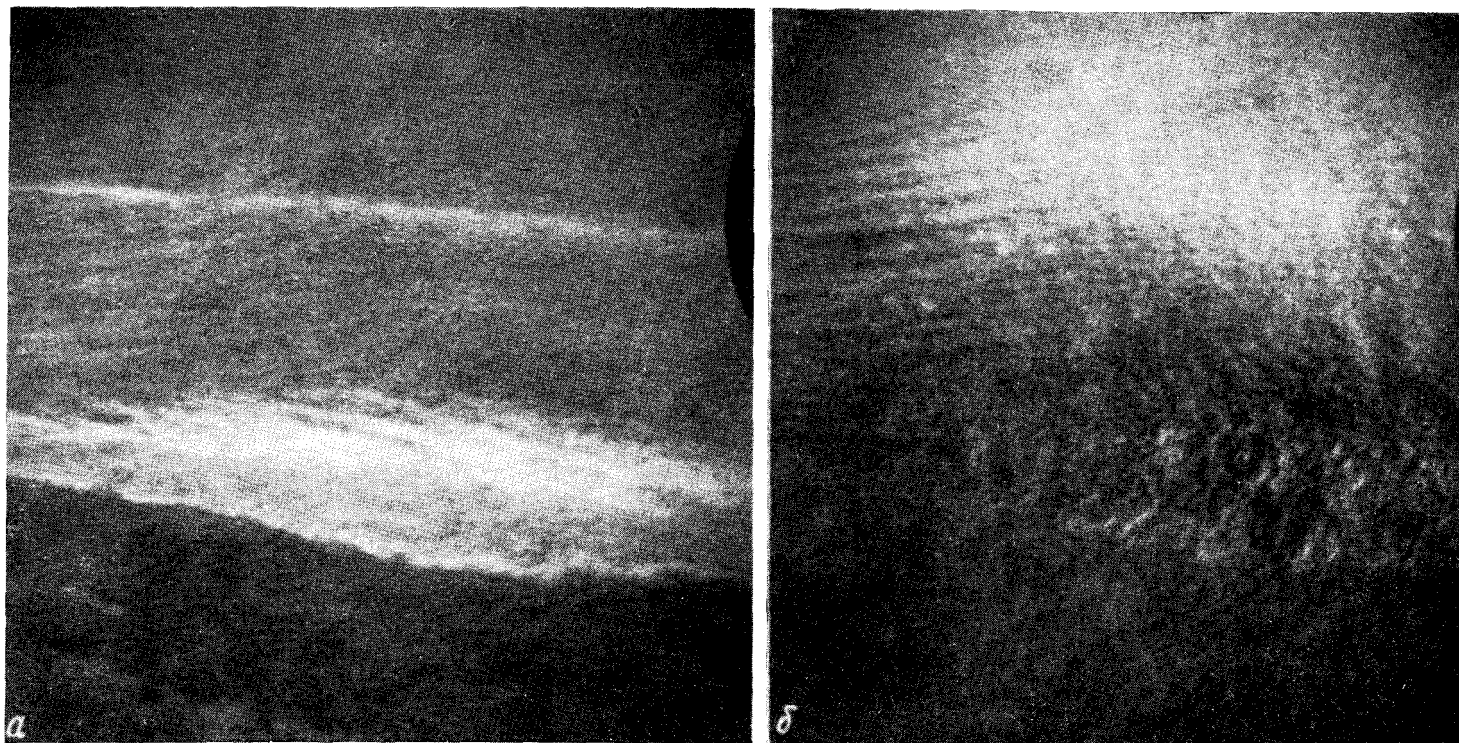


Рис. 1. Фотографическое изображение участка загрязненной поверхности моря в лучах: нормально поляризованной (а) и параллельно поляризованной компонент (б); угол визирования  $\theta=45^\circ$ , азимутальный угол  $\varphi=180^\circ$ , зенитное расстояние Солнца  $i=45^\circ$ , небо безоблачное

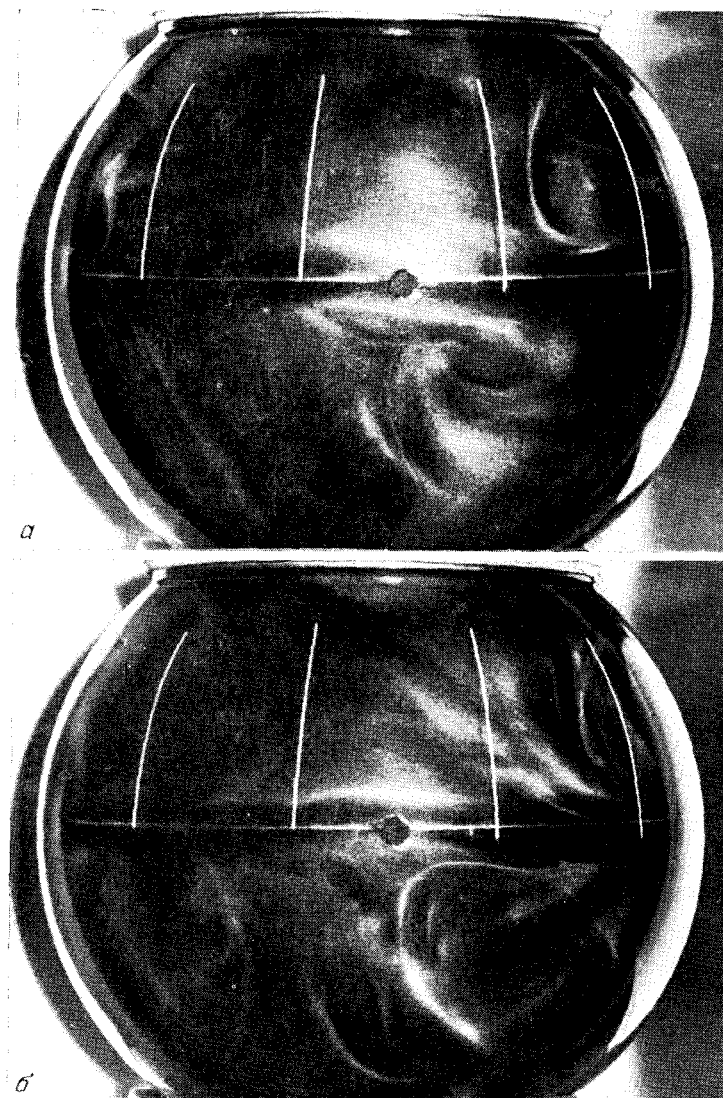


Рис. 1. Вихри вторичного волнового течения в сферическом слое. *а* —  $Re = 1630 \pm 80$ , число вихрей  $n = 4$ ; *б* —  $Re = 3000 \pm 150$ ,  $n = 3$ .  $\delta = 0,54$ ;  $\omega = 0$ . Угловое расстояние между белыми полосоми в верхней полусфере равно  $30^\circ$

В реальных условиях необходимо учитывать, что отражение радиации от морской взволнованной поверхности весьма отличается от зеркального отражения и обусловлено совокупностью отражений, происходящих по законам геометрической оптики от статистически распределенных по ориентациям площадок. По этой причине область углов, для которой коэффициент отражения  $R$  прямой солнечной радиации убывает только в 2 раза по отношению к максимальному значению, приблизительно составляет при скорости ветра  $v \sim 10$  м/сек от  $0$  до  $45^\circ$  по  $\theta$  и от  $-30$  до  $+30^\circ$  по  $\varphi$  при  $i = 20^\circ$  и от  $30$  до  $90^\circ$  по  $\theta$  и от  $-15$  до  $+15^\circ$  по  $\varphi$  при  $i = 40^\circ$  ( $\theta$  — угол визирования,  $\varphi$  — азимутальный угол относительно основной плоскости,  $i$  — зенитное расстояние Солнца) (8):

Поскольку для наших целей наблюдение морской поверхности в зеркально отраженных солнечных лучах наименее желательно из-за слепящего эффекта бликов, то отсюда следует, что визирование следует производить при азимутальных углах, превышающих на  $5-10^\circ$  указанные выше значения  $\varphi$  для соответствующих  $\theta$  и  $i$ . При выполнении этого условия отражение от поверхности будет в основном обусловлено светом, рассеянным атмосферой. По данным работы (9) для  $v = 10$  м/сек и  $i = 20^\circ$  вклад отраженной радиации ( $\theta = 30-60^\circ$ ) оказывается более 80% при  $\varphi > \pm 60^\circ$ ; при  $i = 60^\circ$  азимутальные углы должны быть более  $\pm 30^\circ$  ( $\theta = 0-80^\circ$ ).

Приведенные области углов наблюдения можно уточнить, если принять во внимание, что свет, рассеянный атмосферой, сам по себе уже поляризован, причем степень его поляризации есть функция зенитного расстояния Солнца  $i$ , азимутального направления  $\varphi$  и длины волны  $\lambda$  (10). Для обсуждаемой методики с регистрацией только нормальной составляющей отраженной радиации желательно ее максимальное содержание в падающем на поверхность моря свете.

В соответствии с данными работ (7, 10) отношение нормально поляризованной компоненты к параллельно поляризованной в потоке рассеянной небом радиации в диапазоне длин волн  $370-470$  нм при  $i < 40^\circ$  максимально в направлениях, противоположных Солнцу. Можно ожидать, что указанная область длин волн предпочтительна и по причине известного увеличения различий в коэффициентах преломления (а следовательно, и коэффициентов отражения) у нефти и воды в коротковолновой области спектра (4, 5). Тем не менее при этом следует иметь в виду, что, с другой стороны, в результате экранирования нефтяной пленкой рассеянного водой света, имеющего максимум интенсивности в сине-зеленой области спектра (3), контраст должен спизиться. Однако излучение, рассеянное водой и вышедшее на поверхность в указанных выше направлениях, не превышает  $\sim 10\%$  относительно общего энергетического потока с поверхности моря в тех же телесных углах (11). Поэтому отмеченное уменьшение контраста не может быть значительным и общее его изменение в коротковолновой области спектра, по-видимому, должно иметь положительный характер. В условиях сплошной облачности предпочтительных азимутальных направлений во всем видимом диапазоне длин волн не существует (10).

Таким образом, из сказанного выше следует, что дистанционное зондирование нефтяных пленок на поверхности моря желательно производить

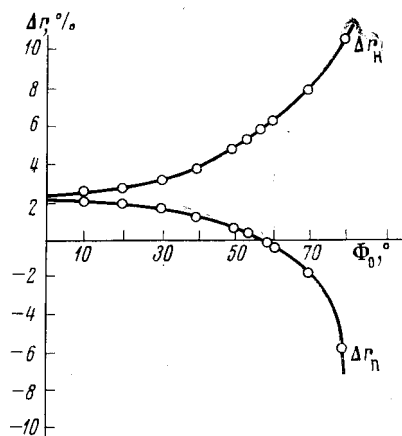


Рис. 2. Рассчитанные величины разности энергетических коэффициентов отражения от поверхности воды ( $n = 1,34$ ) и нефтяной пленки ( $n = 1,52$ )

в коротковолновой области спектра при зенитных расстояниях Солнца  $i < 40^\circ$ , углах визирования  $\theta = 40-45^\circ$ , азимутальных углах  $\varphi > \pm 30-50^\circ$  (в зависимости от скорости ветра и значений  $i$ ) с предпочтительным направлением, противоположным Солнцу.

Приведенные выше соображения и легли в основу эксперимента, осуществленного над акваторией Каспийского моря с берега вертолета МИ-8. В качестве регистрирующей аппаратуры использовались двух- и четырех-объективные фотокамеры с фокусным расстоянием  $F=7,5$  см. Съемка в поляризованном свете осуществлялась в области 400–800 нм при помощи поляроидов, укрепленных перед объективами и ориентированных таким образом, что на пленке одновременно фиксировалось два изображения

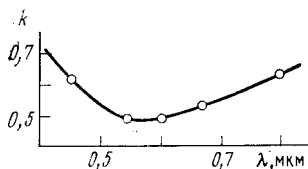


Рис. 3. Спектральный контраст системы нефтяная пленка — вода

одного и того же участка поверхности от нормально и параллельно поляризованных компонент радиации, поступающей с поверхности моря. Выделение спектральных интервалов производилось стеклянными светофильтрами, также укрепленными перед объективами.

Полеты проходили на высотах 100–200 м. Углы визирования составляли  $0-45^\circ$ , азимутальные углы изменялись от 0 до  $\pm 180^\circ$ , зенитное расстояние Солнца было  $40-50^\circ$ . Съемки проводили как в солнечные дни, так и в условиях сплошной облачности при состоянии поверхности моря от штиля до 3–4 баллов.

Полученные данные позволяют сделать вывод о высокой эффективности обсуждаемого поляризационного метода для дистанционной индикации нефтяных пленок. Нефтяные пятна на морской поверхности проявляются наиболее контрастно на снимках (см. рис. 1а), полученных в нормально поляризованных лучах. Этот контраст оказывается в значительной мере усиленным благодаря тому, что в нормально поляризованных лучах поверхность моря выглядит более плоско, менее детализированно в сравнении с изображением в неполяризованном свете. Это объясняется, по-видимому, тем, что отражение от статистически распределенных в пространстве площадок поверхности моря происходит в основном в углах, для которых величина  $r_n$  меняется относительно мало, в то время как в неполяризованном свете начинает сказываться  $r_n$ -составляющая, изменения которой в зависимости от  $\Phi_0$  могут быть весьма значительными (см. рис. 2). По этой причине снимки в параллельно поляризованных лучах наиболее контрастно выявляют структуру волнения поверхности (см. рис. 1б), в то время как контраст нефть — вода столь исчезающе мал (ввиду незначительных различий в величинах  $r_n$  для нефти и воды, см. выше), что на большинстве снимков он не обнаруживается вовсе.

Представляется уместным заметить, что съемка в параллельно поляризованных лучах, не эффективная для дистанционного обнаружения разливов нефти, может оказаться эффективной для дистанционной оценки скорости местных приповерхностных ветров, например, по методу солнечных бликов<sup>(12)</sup>, для которого существенно важно отчетливое изображение структуры взволнованной поверхности моря.

Полученный экспериментальный материал свидетельствует о том, что данная поляризационная методика оправдывает себя во всем обозначенном выше диапазоне азимутальных углов при волнении моря до 3 баллов. При больших волнениях нефтяная пленка сбивается, эмульгируется, образуя устойчивые нефтеводные эмульсии, содержащие до 80% воды<sup>(1, 2)</sup>. Эти эмульсии желтовато-коричневого цвета известны как «шоколадный мусс». Их оптические свойства уже отличаются от оптических свойств рассмотренных нефтяных пленок и поляризационный метод в таком виде оказывается непригодным для их дистанционного обнаружения. Выполненные нами исследования зависимости контраста  $K$  системы нефтяная

пленка — вода от спектрального интервала, в котором производится дистанционное зондирование, показали (рис. 3), что величина  $K$  увеличивается с уменьшением длины волны. Этот результат находится как в соответствии с высказанными выше соображениями относительно оптимальной спектральной области зондирования, так и с экспериментальными данными (<sup>3</sup>, <sup>7</sup>). К этому следует добавить, что экстраполяция полученных данных на область 800—900 нм дает основание ожидать, что близкая и.-к. область также является достаточно эффективной при обнаружении нефтяных пленок на поверхности моря.

Ленинградский государственный университет  
им. А. А. Жданова

Поступило  
11 III 1974

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Л. Смитт, Загрязнение моря нефтью, М., 1973. <sup>2</sup> J. E. Smith, «Torry Canyon» Pollution and Marine Life, Cambridge, 1971. <sup>3</sup> К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников, Д. В. Подняков, Водные ресурсы, т. 3, 65 (1972). <sup>4</sup> Химический состав нефти и нефтепродуктов, Ред. А. Н. Саханов, Тр. Н.-н. инст. Грознефти им. И. Коснора, 1938. <sup>5</sup> N. E. Dorsey, Properties of Ordinary Water Substance, N. Y., 1940. <sup>6</sup> Barringer Research Ltd., The Feasibility of Detection of and Classification of Fish Oil Slicks by Remote Sensing, Ontario, Canada, 1968. <sup>7</sup> J. P. Millard, J. C. Arvesen, AIAA Paper, 71-1075. <sup>8</sup> О. А. Авасте, Ю. Р. Мулламаа, К. С. Шифрин, Исследования по физике атмосферы, ИФА АН СССР, № 6 (1964). <sup>9</sup> К. С. Шифрин, В. Ю. Коломийцев, Тр. Гл. геофизич. обсерв., в. 221, 108 (1968). <sup>10</sup> K. N. Coulson, J. V. Dave, Z. Sekera, Tables Related to Radiation Emerging from a Planetary Atmosphere with Rayley Scattering, Berkley, 1960. <sup>11</sup> В. Ю. Коломийцев, Тр. Гл. геофизич. обсерв., в. 221, 117 (1968). <sup>12</sup> N. Levanon, J. Phys. Oceanogr., v. 1, 3 (1971).