

УДК 528.855

Обнаружение разлива нефтепродуктов в виде эмульсий и отдельных пленок на поверхности Берингова моря с помощью гиперспектральной оптической радиометрии в августе 2013 г.

И.Е. Стёпочкин¹, П.А. Салюк¹, В.А. Качур^{2*}

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

²Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5

Поступила в редакцию 5.11.2020 г.

Проанализированы спектры коэффициентов яркости моря, измеренные дистанционно с борта судна в районе разлива нефти марки Ugals, находившейся на морской поверхности в эмульгированном виде и в виде небольших пленок площадью порядка 1 м². Загрязнение обнаружено в Беринговом море около м. Наварин 4 августа 2013 г. во время рейса на учебно-производственном судне «Профессор Хлюстин». Дополнительно использованы данные проточных флуориметрических *in situ* измерений концентраций хлорофилла *a* и окрашенного растворенного органического вещества на глубине 4 м, где влияния загрязнения зафиксировано не было. Проведен анализ влияния нефти на регрессионные соотношения между результатами дистанционных и *in situ* измерений. Получен предварительный способ обнаружения на морской поверхности нефтяного загрязнения с помощью дистанционных измерений спектров коэффициента яркости моря.

Ключевые слова: оптика океана, коэффициент яркости моря, нефтяной разлив, хлорофилл *a*, растворенное органическое вещество, эмульсия, Берингово море; ocean optics, remote sensing reflectance, oil spill, chlorophyll *a*, dissolved organic matter, emulsion, the Bering Sea.

Введение

Разливы нефтепродуктов на поверхности моря — частые явления; они могут носить как антропогенный, так и природный характер. Местоположение антропогенных разливов хорошо согласуется с основными маршрутами судоходства: 48% загрязнений приходится на топливо, 29% — на сырую нефть [1]. Согласно данным European Space Agency (ESA) еще в конце 1990-х гг. 45% загрязнений нефтепродуктами приходилось на регулярные сбросы с судов, в то время как на добычу нефти на шельфе — только 2% [2]. В последние два десятилетия принято множество мер для снижения подобного негативного воздействия на морскую среду, которые дают положительный эффект: при увеличении объема морских перевозок нефти более чем на 50% за последние 20 лет количество разливов, связанных с авариями, снизилось на 65% [3]. Тем не менее каждый год в Мировой океан попадет порядка 8000 т только сырой нефти [4]. При этом не учитываются сбросы льяльных вод с судов или прочие возможные утечки в процессе

транспортировки и потребления, которые достигают 37% от всего объема нефти, поступающей в морскую среду [5]. Можно сказать, что в мире имеют место регулярные разливы на одних и тех же акваториях (вблизи судоходных путей). Это представляет не меньшую угрозу для морской среды, чем единичные крупные аварии, такие как крушение танкера «Престиж» (2002 г.), взрыв на буровой платформе Deep Water Horizon (2010 г.) или авария на танкере Sanchi (2018 г.).

Другим существенным источником нефти на морской поверхности являются естественные выходы углеводородов (так называемые «сипы»), которые происходят на 10–15% площади Мирового океана [6], составляя при этом по объему до 46% от всех поступлений углеводородов [5]. Изучение естественных выходов важно с точки зрения поиска новых месторождений и понимания процессов функционирования экосистем в этих районах.

Общепризнанный эффективный метод обнаружения и мониторинга разлива нефтепродуктов — спутниковое зондирование в микроволновом и оптическом диапазонах [7]. Использование видимого оптического диапазона (400–800 нм) спутниковых спектрорадиометров, позволяющих определять коэффициенты яркости моря, таких как MODIS, VIIRS, OLCI, SGLI, GOCI, для обнаружения нефтяных

* Игорь Евгеньевич Стёпочкин (stepochkin.ie@poi.dvo.ru); Павел Анатольевич Салюк (pavel.salyuk@gmail.com); Василий Анатольевич Качур (vkachur@gmail.com).

пленок (НП) имеет свои преимущества и недостатки по сравнению с применением микроволнового диапазона, используемого в радарх с синтезированной апертурой (РСА). Сигнал РСА, в отличие от видимого, не подвержен воздействию атмосферы и с высокой точностью характеризует «шероховатость» водной поверхности, по которой возможно обнаружить слик. Однако причина появления сликов требует дополнительной верификации, и их измерение возможно только при скорости ветра $\sim 2\text{--}10$ м/с [8]. В свою очередь, сигнал видимого диапазона содержит в себе информацию о спектральном составе восходящего излучения, а следовательно, — о количественном содержании биологических оптически активных компонентов воды (в частности, фитопланктона и окрашенного растворенного органического вещества — ОРОВ) [9]. Это позволяет, во-первых, качественно оценить экологическое состояние водной среды, а во-вторых, отличить нефтяную пленку на воде от пленок биологического происхождения. Также следует отметить, что данные многих работающих в настоящее время пассивных оптических спутниковых радиометров полностью бесплатны и открыты для использования в отличие от данных РСА [10].

Одной из особенностей дистанционного зондирования загрязнений морской поверхности нефтепродуктами в оптическом диапазоне является как увеличение, так и уменьшение регистрируемого сигнала в зависимости от толщины пленки на морской поверхности, стадии ее диспергирования и разложения, геометрии наблюдения. Согласно Боннскому соглашению [11] пленкам нефтепродуктов, образующимся на водной поверхности, присваиваются условные коды (Bonn Agreement Oil Appearance Code) в соответствии с их толщиной (таблица). Вместе с тем каждый код определяется различиями пленок по внешнему виду и, следовательно, по их оптическим характеристикам в видимом диапазоне. В настоящей статье будут рассматриваться результаты, полученные на пленках кода 1 и эмульсиях нефти в морской воде.

Система кодирования внешнего вида нефтепродуктов в соответствии с Боннским соглашением (действует с января 2004 г.) [11]

Код	Внешний вид	Диапазон толщины слоя, мкм	Объем нефтепродукта на единицу площади, л/км ²
1	глянцевый (серебристый/серый)	0,04–0,3	4–300
2	радужный	0,3–5	300–5000
3	металлический	5–50	5000–50000
4	прерывистый истинный цвет нефти	50–200	50000–200000
5	истинный цвет нефти	> 200	> 200000

НП с кодами 1–3 представляют наибольшую сложность для дистанционного изучения, поскольку их внешний вид в равной степени обусловлен поглощением, рассеянием и флуоресценцией, геометрией

освещения и регистрации сигнала, а также размыванием, испарением, диспергированием [12] и растворением [13] самой нефти. У более толстых НП преобладает поглощение в ближней инфракрасной области (БИК) спектра, они явно видны на спутниковых снимках. Вместе с тем для НП толщиной более 2 мм стирается различие в спектрах оптических показателей [14].

По сравнению с морской водой НП характеризуются повышенным коэффициентом поглощения света и меньшей прозрачностью [15], более высоким коэффициентом преломления света (1,57–1,67 в УФ- и 1,4–1,52 в видимой областях против 1,34) [16] и, следовательно, большими коэффициентами отражения Френеля. При этом НП способны «сглаживать» малое и умеренное волнение морской поверхности. Это может привести к тому, что при регистрации цвета поверхности моря по протоколам NASA [17] усредненный коэффициент отражения излучения неба от взволнованной морской поверхности в поле зрения детектора может быть меньше для районов с меньшим волнением относительно соседних районов с большим волнением [18].

Нефтепродукты поглощают солнечный свет и испускают некоторую его часть в виде тепловой энергии в ИК-области спектра менее интенсивно, чем окружающая вода, поэтому спектр нефти в ИК-диапазоне имеет характерную форму, зависящую от толщины слоя. Толстая пленка поглощает больше света, а значит имеет более высокую яркостную температуру в ИК-области; пленка меньшей толщины выглядит «холоднее». На очень тонких пленках или эмульсиях этот эффект не проявляется, их невозможно отличить от окружающей воды по указанному признаку. Минимальная обнаружимая толщина составляет от 20 до 70 мкм [19]. В УФ-области коэффициент отражения Френеля у нефти выше, чем у воды, и по контрасту можно различить тонкие пленки, но это отличие пропадает при толщине НП более 10 мкм [20].

Также при измерении коэффициента яркости моря значимый вклад в УФ- и синюю спектральную области может давать флуоресценция нефти, спектр которой зависит от типа нефтепродукта и стадии его разложения в морской воде. Однако в случае солнечного индуцирования спектр флуоресценции становится настолько «размытым», что его сложно отделить от сигналов восходящего излучения моря, формируемых в морской толще. Несмотря на это, толстые пленки возможно классифицировать по типам нефтепродуктов, как, например, в [21], где была исследована связь между солнечно-индуцированной и лазерно-индуцированной флуоресценцией пленки сырой нефти толщиной 1,8 мм в окнах оптической прозрачности.

Традиционный подход для обнаружения НП дистанционными методами — анализ контраста между чистой и загрязненной зонами (например, [16], [22]). Посчитанный для определенного нефтепродукта контраст может быть его характерным признаком. Однако в реальных условиях значения контраста в полях коэффициентов яркости моря сильно

зависят от ветра и оптического типа вод и зачастую НП малоотличимы от биогенных пленок [23]. Поэтому важно определение тех параметров, которые позволят обеспечить необходимую избирательность при детектировании НП в различных условиях.

В настоящей работе проведен совместный анализ данных судовых радиометрических измерений восходящего излучения моря и проточных флуориметрических измерений концентраций хлорофилла *a* и ОРОВ в районе разлива нефти в Беринговом море в августе 2013 г. Нефть находилась в виде эмульсий и отдельных пленок. Полученные результаты позволяют принимать оперативное решение о наличии нефтяного загрязнения на морской акватории.

Район проведенного исследования

Во время арктической экспедиции на НИС «Профессор Хлюстин» в Беринговом море в районе м. Наварин 4 августа 2013 г. в 21:00 UTC в точке с координатами 61,81° с.ш., 177,63° в.д. было обнаружено нефтяное загрязнение (рис. 1), которое находилось на морской поверхности в виде эмульсий и множества отдельных тонких пленок размером порядка 1 м² (рис. 2), слабо различимых визуально с борта судна и образовавшихся, по всей видимости, в результате ветрового и волнового воздействий. Результаты анализа в химической лаборатории (Дальне-

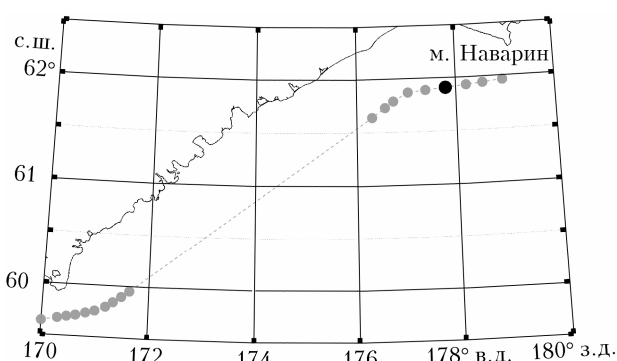


Рис. 1. Точки маршрута экспедиции (фрагмент за 3–4 августа 2013 г.), в которых были выполнены радиометрические измерения; черная точка — место обнаружения нефтяной пленки



Рис. 2. Нефтяное загрязнение (сделан отбор воды с поверхности)

восточный центр структурных исследований Института химии ДВО РАН) показали, что это была сырая нефть марки Urals.

Методы измерений

В момент наблюдения загрязнения и в течение всего рейса проводились измерения спектров коэффициента яркости моря $R_{rs}(\lambda)$ с использованием ручного гиперспектрального радиометра ASD FieldSpec HandHeld в диапазоне 325–1025 нм с разрешением 1 нм (апертура используемого объектива составляла 10°), а также непрерывные проточные флуориметрические измерения концентрации хлорофилла *a* и ОРОВ при помощи флуориметра на глубине 4 м. Подробнее методы и приборы описаны в [24, 25]. Под гиперспектральными радиометрическими измерениями понимаются спектрально равномерные измерения с разрешением, равным или меньшим 10 нм. У них есть преимущества в сравнении с мультиспектральными измерениями, при которых количество каналов ограничено, их полуширина различна и обычно находится в диапазоне 10–30 нм, а положение каналов неравномерно [26]. Гиперспектральные измерения морской поверхности в видимом диапазоне позволяют учесть спектральные особенности основных оптически активных компонентов морской воды при оценке их вклада в интенсивность восходящего излучения моря.

Спектр коэффициента яркости моря определялся в соответствии с протоколами NASA для надводных измерений [17] следующим образом:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda) - \rho L_n(\lambda)}{\pi L_d(\lambda)}, \quad (1)$$

где $L_w(\lambda)$ — спектр яркости моря, измеренный под углом -45° к морской поверхности при азимуте 135° относительно Солнца; $L_n(\lambda)$ — спектр яркости участка неба, измеренный под углом $+45^\circ$ к морской поверхности при том же азимуте; $L_d(\lambda)$ — спектр яркости белого диска, близкого к Ламбертовой поверхности, который использовался в качестве оценки падающей солнечной освещенности (спектр был скорректирован на двулучевую функцию отражательной способности диска); ρ — безразмерный коэффициент отражения света участком морской поверхности в поле зрения радиометра. Все измерения проводились при высоте Солнца над горизонтом не менее 20° . Ошибка определения $R_{rs}(\lambda)$ в диапазоне 350–560 нм составляла 5–10%. Используемый в формуле (1) коэффициент отражения света не является коэффициентом отражения Френеля, поскольку включает в себя сигналы от участков с различным наклоном морской поверхности и от неравномерно освещенных участков неба. Только в случае полного штиля и равномерного распределения яркости неба этот коэффициент становится равным коэффициенту отражения Френеля [18]. Значения ρ получены из результатов моделирования распространения света [18] в зависимости от геометрии наблюдения, зенитного угла Солнца и скорости ветра.

При выбранной геометрии наблюдения с ростом скорости ветра значение ρ увеличивалось и изменялось в пределах 0,0025–0,0045.

Для всех измеренных спектров $R_{rs}(\lambda)$ проводилась процедура коррекции в БИК-области, заключающаяся в приведении сигнала $R_{rs}(\lambda)$ в диапазоне 745–755 нм к нулю в предположении, что поверхность достаточно чистых морских вод в этом спектральном диапазоне не излучает свет. Применение процедуры рекомендовано при определении спектров $R_{rs}(\lambda)$ с борта судна с еще одним допущением – что отраженное излучение от участка неба является спектрально независимым [17]. В анализе полученных данных использовались спектры, прошедшие БИК-коррекцию.

Полученные результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены спектры $R_{rs}(\lambda)$, измеренные в течение всего рейса. Следует обратить внимание, что спектр $R_{rs}(\lambda)$, измеряемый над нефтяным пятном, до коррекции в БИК-области имеет отрицательные значения при $\lambda > 600$ нм, поскольку ρ , входящий в формулу для $R_{rs}(\lambda)$, рассчитывался по процедурам для чистой воды без нефти [27], в которые входит зависимость от морского волнения и скорости ветра. Тот факт, что значения стали отрицательными, говорит о том, что истинное значение коэффициента должно быть ниже, чем расчетное. Большинство описанных во введении изменений оптических характеристик морской поверхности, а именно возможная дополнительная солнечно-индуцированная флуоресценция, увеличение коэффициента преломления и соответствующее увеличение коэффициента отражения Френеля при попадании нефти, должны были бы увеличивать регистрируемое излучение в диапазоне 600–800 нм. Однако полученные отрицательные значения свидетельствуют о том, что эффект завышенного коэффициента отражения оказался существеннее. Поэтому для корректировки спектра над нефтяным загрязнением был подобран дополнительный коэффициент r_{oil} , сводящий $R_{rs}(\lambda)$ в области БИК к нулю:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_v(\lambda) - \rho r_{oil} L_n(\lambda)}{\pi L_d(\lambda)}. \quad (2)$$

На рис. 3, б видно, что при наличии нефтяного загрязнения коэффициенты яркости моря стали минимальными в диапазоне 420–580 нм и значимо отличаются от всех других спектров, измеренных в чистой воде во время рейса.

По данным флуориметра, влияния нефтяного загрязнения в рядах измерений концентрации хлорофилла a и ОРОВ обнаружено не было. Это связано с тем, что измерения были проведены на глубине 4 м, куда растворенные фракции нефти еще не опустились и физиологическое состояние клеток фитопланктона значимо не изменилось.

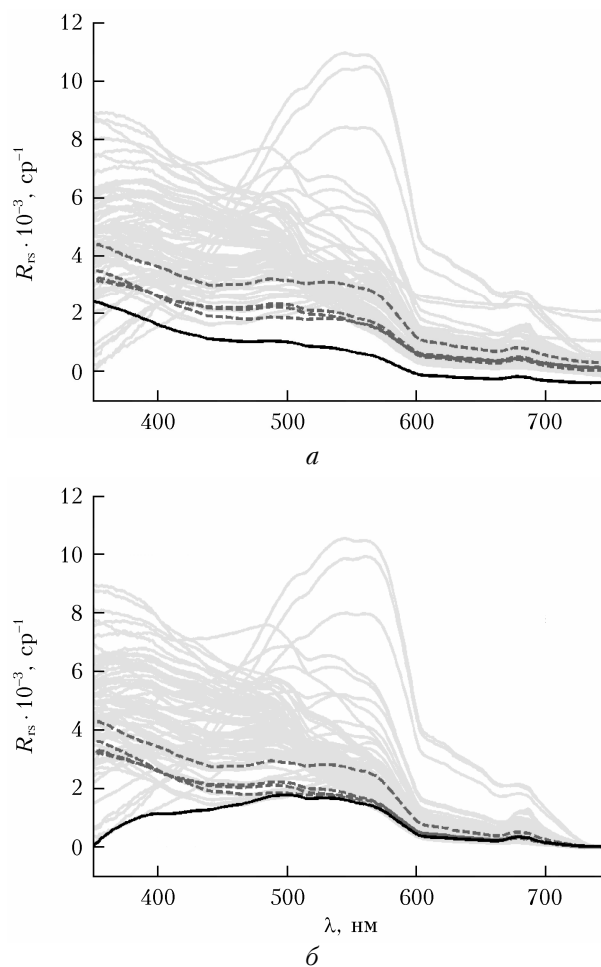


Рис. 3. Спектры коэффициентов яркости моря, полученные во время рейса, без (а) и после проведения коррекции в БИК-области (б): полужирная черная кривая – спектр, измеренный в районе с наблюдаемыми нефтяными загрязнениями на морской поверхности; темно-серые штриховые кривые – спектры чистой воды, полученные в этот же день; светло-серые кривые – все остальные спектры, полученные в рейсе

Минимальное значение коэффициента яркости моря не является избирательным критерием наличия нефти, поскольку похожие значения могут быть получены при других соотношениях оптически активных компонентов в морской воде. Чтобы с большей избирательностью определить критерий, мы сравнили массив всех данных $R_{rs}(\lambda)$, включающий точку, подверженную влиянию нефти, и массив данных флуориметрических измерений на глубине 4 м, которые от наличия нефти не зависели. Таким образом, широко используемый метод анализа спектрального контраста был совмещен с *in situ* параметрами среды.

На рис. 4, а представлен пример диаграммы рассеяния значений десятичного логарифма концентрации хлорофилла a и всех значений R_{rs} на длине волны 488 нм. На рис. 4, б значения $R_{rs}(488)$ нормированы на $R_{rs}(555)$, что соответствует стандартному алгоритму определения концентрации хлоро-

филла a по синне-зеленому соотношению [28]. Значение, полученное во время наблюдаемого нефтяного загрязнения, отмечено черной точкой.

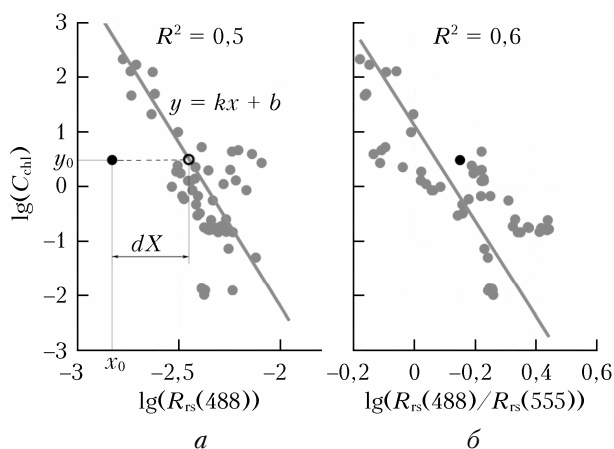


Рис. 4. Пример диаграммы рассеяния значений десятичного логарифма концентрации хлорофилла a (C_{chl}) и десятичного логарифма R_{rs} на $\lambda = 488$ нм: a – без нормировки, b – с нормировкой на R_{rs} на $\lambda = 555$ нм

Обращает на себя внимание тот факт, что при нормировке коэффициентов яркости значение, полученное при наличии нефтяного загрязнения, не является выбросом, в то время как при сравнении с ненормированным коэффициентом яркости оно явно выделяется из робастной линейной зависимости: имеет нулевой вес при использовании биквадратной весовой функции и является статистически значимым выбросом. Возможность правильно оценить концентрацию хлорофилла a при наличии нефти говорит о том, что на поверхности наблюдались участки как с эмульгированной нефтью, так и с открытой водой. Аналогичная ситуация наблюдается и в других спектральных каналах, в том числе для концентрации ОРОВ.

Для интерпретации полученного наблюдения рассмотрим выражение коэффициента яркости через коэффициенты поглощения и рассеяния воды:

$$R_{rs}(\lambda) \sim \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}, \quad (3)$$

где $a(\lambda)$ – общий коэффициент поглощения света морской водой, равный сумме поглощения чистой морской водой, фитопланктоном, ОРОВ, детритами и нефтью; $b_b(\lambda)$ – коэффициент обратного рассеяния света морской водой. Если $b_b(\lambda) \ll a(\lambda)$, то

$$R_{rs}(\lambda) \sim \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)}. \quad (4)$$

При наличии нефти поглощение морской водой увеличивается и коэффициент яркости должен уменьшаться, что наблюдается на рис. 3, б. Так как при нормировке $R_{rs}(488)$ на $R_{rs}(555)$ точка с нефтью перестает быть выбросом (см. рис. 4, б), можно

предположить, что на $\lambda = 488$ и 555 нм дополнительное поглощение, вызванное наличием нефти, примерно одинаково и минимизируется при нормировке.

$$\frac{R_{rs}(488)}{R_{rs}(555)} = \frac{b_b(488)}{b_b(555)} \cdot \frac{a^*(555) + a_{oil}(555)}{a^*(488) + a_{oil}(488)}, \quad (5)$$

где $a^*(\lambda)$ – общий коэффициент поглощения чистой морской водой без нефти; $a_{oil}(\lambda)$ – коэффициент поглощения нефтью.

Изменение коэффициента яркости моря, вызванное наличием нефти, можно характеризовать множителем k_{oil} , на который необходимо умножить $R_{rs}(488)$, чтобы это значение «легло» на соответствующую робастную линейную регрессию на рис. 4, а:

$$k_{oil} = \frac{y_0 - b}{kx_0}. \quad (6)$$

Для определения спектрального распределения коэффициента $k_{oil}(\lambda)$ был проведен аналогичный анализ для каждой длины волны из рассматриваемого диапазона при сравнении $R_{rs}(\lambda)$ с концентрациями хлорофилла a и ОРОВ. Результаты показаны на рис. 5. Приведены только те значения множителя, для которых коэффициент детерминации $R^2 > 0,5$ при сравнении дистанционных и *in situ* данных, что обеспечивает достоверность используемого способа. Значения полученного множителя изображены тонкой линией, значения коэффициента детерминации – звездочками. Серый цвет соответствует значениям, полученным при сравнении с концентрацией ОРОВ, черный – с концентрацией хлорофилла a .

Значения множителя $k_{oil}(\lambda)$ примерно совпадают для способов расчета через сравнение $R_{rs}(\lambda)$ с концентрациями хлорофилла a и ОРОВ. При этом значимые регрессии получены в диапазонах, где каждый из рассматриваемых компонентов вносит основной вклад в изменчивость цвета морской поверхности. Это говорит о корректности примененного анализа. Поскольку спектр множителя $k_{oil}(\lambda)$ обратно пропорционален типичному спектру поглощения нефти [29], что согласуется с формулой (4), это достоверно говорит о наличии нефти на морской поверхности. Таким образом, при расчете множителя, уменьшающего коэффициент яркости, и на основе анализа его спектрального распределения можно обнаружить нефть и грубо оценить ее содержание. Этот способ является более избирательным по сравнению с традиционными подходами, где анализируется только контраст значений $R_{rs}(\lambda)$ на отдельных длинах волн по пространству или интерпретируются интегральные значения по спектру, поскольку он показывает, как нефтяное загрязнение изменяет спектр восходящего излучения с учетом оптически активного содержимого воды. Ввиду ограниченного набора данных о наличии загрязнения вышеописанный способ является предварительным и требует дополнительной проверки и валидации. В дальнейшем возможно развитие полученного способа путем

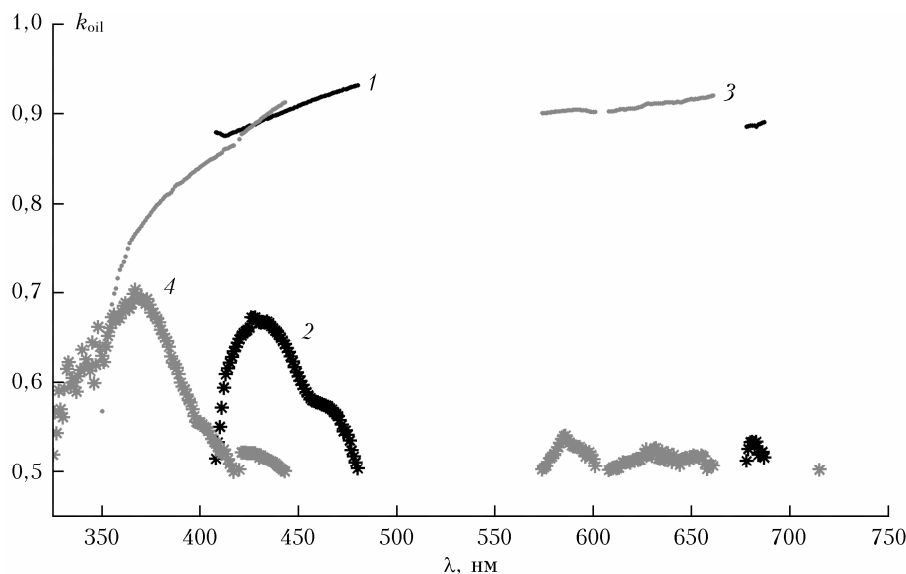


Рис. 5. Спектр коэффициента k_{oil} : 1 – $k_{oil}(\lambda)$, рассчитанный путем сравнения $R_{rs}(\lambda)$ с концентрациями хлорофилла a ; 2 – R^2 , соответствующий кривой 1; 3 – $k_{oil}(\lambda)$, рассчитанный путем сравнения $R_{rs}(\lambda)$ с концентрациями ОРОВ; 4 – R^2 , соответствующий кривой 3

оценки коэффициентов яркости моря для незагрязненной морской воды из соседних районов или сигнала солнечно-индуцированной флуоресценции хлорофилла a .

Заключение

Таким образом, с помощью спектров коэффициентов яркости моря $k_{oil}(\lambda)$ 4 августа 2013 г. обнаружено нефтяное загрязнение в Беринговом море около м. Наварин. Предложен предварительный вариант способа обнаружения на морской поверхности нефтяного загрязнения, находящегося в виде эмульсий и небольших пленок размером $\sim 1 \text{ м}^2$, с помощью гиперспектрального оптического радиометра и данных *in situ* измерений содержания хлорофилла a и окрашенных растворенных органических веществ естественного происхождения. По спектральному распределению коэффициента $R_{rs}(\lambda)$ возможно обнаружить наличие нефти на морской поверхности и перейти к оценке ее содержания в морской воде.

Полученные результаты можно использовать на практике, совместно анализируя данные флуориметров и спектро радиометров, установленных на плавучих буйках или робототехнических средствах, перемещающихся в местах предполагаемых месторождений нефти или возможного загрязнения. В дальнейшем исследовании планируется более детально проанализировать доступные глобальные наборы *in situ* данных (SeaBass, NOMAD, буй ARGO) в районах разливов, чтобы таким образом получить спектральные характеристики для пленок различной толщины. Это позволит расширить применение спутниковых данных для обнаружения разливов нефтепродуктов, находящегося на морской поверхности в различном состоянии.

Представленное исследование выполнено в рамках государственной бюджетной темы № АААА-

А19-119122090009-2, а также при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-32-20146 мол_а_вед).

1. Liu P., Zhao C., Li X., He M., Pichel W. Identification of ocean oil spills in SAR imagery based on fuzzy logic algorithm // Int. J. Remote Sens. 2010. V. 31, iss. 17–18. P. 4819–4833. DOI: 10.1080/01431161.2010.485147.
2. URL: <https://earth.esa.int/documents/10174/1598482/GEN49.pdf> (last access: 5.10.2020).
3. Galierikova A., Materna M. World seaborne trade with oil: One of main cause for oil spills? // Transport. Res. Procedia. 2020. V. 44. P. 297–304. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.02.039.
4. Prabowo A.R., Bae D.M. Environmental risk of maritime territory subjected to accidental phenomena: Correlation of oil spill and ship grounding in the Exxon Valdez's case // Results Eng. 2019. V. 4. P. 100035. DOI: 10.1016/j.rineng.2019.100035.
5. National Research Council 2003. Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. Washington, DC: The National Academies Press, 265 p. DOI: 10.17226/10388.
6. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / В.Г. Бондур (сост.). М.: Научный мир, 2012. 558 с.
7. Brekke C., Solberg A.H.S. Oil spill detection by satellite remote sensing // Remote Sens. Environ. 2005. V. 95, iss. 1. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.rse.2004.11.015.
8. Chaudhary V., Kumar S. Marine oil slicks detection using spaceborne and airborne SAR data // Adv. Space Res. 2020 V. 66, iss. 4. P. 854–872. DOI: 10.1016/j.asr.2020.05.003.
9. Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex waters / S. Sathyendranath (ed.). Dartmouth: IOCCG, 2000. 140 p. DOI: 10.25607/OBP-95.
10. URL: <https://mdacorporation.com/docs/default-source/product-spec-sheets/geospatial-services/radarsat-1-pricing-information.pdf> (last access: 10.09.2020).
11. Bonn agreement aerial operations handbook. URL: <https://www.bonnagreement.org/publications> (last access: 10.09.2020).

12. *Leifer I., Luyendyk B., Broderick K.* Tracking an oil slick from multiple natural sources, Coal Oil Point, California // *Marine Petrol. Geology*. 2006. V. 23, iss. 5. P. 621–630. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2006.05.001.
13. *Салюк П.А., Дорошенко И.М., Букин О.А., Соловова Е.Б., Бауло Е.Н.* Изменения свойств флуоресценции морской воды при ее перемешивании с нефтью // *Оптика атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 5. С. 443–448; *Saluk P.A., Doroshenkov I.M., Bukin O.A., Sokolova E.B., Baulo E.N.* Change of seawater fluorescence properties when mixing with crude oil // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 5. P. 438–443. DOI: 10.1134/S102485601405011X.
14. *Byfield V., Boxall S.* Thickness estimates and classification of surface oil using passive sensing at visible and near-infrared wavelengths // *IEEE*. 1999. P. 1475–1477. DOI: 10.1109/IGARSS.1999.771992.
15. *Lu Y., Li X., Tian Q., Zheng G., Sun S., Liu Y., Yang Q.* Progress in marine oil spill optical remote sensing: Detected targets, spectral response characteristics, and theories // *Marine Geodesy*. 2013. V. 36, N 3. P. 334–346. DOI: 10.1080/01490419.2013.793633.
16. *Quinn M.F., Al-Otaibi A.S., Sethi P.S., Al-Bahrani F., Alameddine O.* Measurement and analysis procedures for remote identification of oil spills using a laser fluorosensor // *Int. J. Remote Sens.* 1994. V. 15, N 13. P. 2637–2658. DOI: 10.1080/01431169408954272.
17. *Mueller J.L., Morel A., Frouin R., Davis C., Arnone R., Carder K., Lee Z.P., Steward R.G., Hooker S., Mobley C.D., McLean S., Holben B., Miller M., Pietras C., Knobelspiesse K.D., Fargion G.S., Porter J., Voss K.* Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4. V. III: Radiometric Measurements and Data Analysis Protocols. Greenbelt: National Aeronautical and Space administration, 2003. 73 p.
18. *Mobley C.D.* Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements // *Appl. Opt.* 1999. V. 38, N 36. P. 7442. DOI: 10.1364/AO.38.007442.
19. *Massi L., Maselli F., Rossano C., Gambineri S., Chatzinikolaou E., Dailianis T., Arvanitidis C., Nuccio C., Scapini F., Lazzara L.* Reflectance spectra classification for the rapid assessment of water ecological quality in Mediterranean ports // *Oceanologia*. 2019. V. 61, N 4. P. 445–459. DOI: 10.1016/j.oceano.2019.04.001.
20. *Osadchy V.Y., Shifrin K.S., Gurevich I.Y., Jaffe J.S.* Remote sensing and measurement of the thickness of oil films on the sea surface using reflectivity contrast // *Proc. SPIE*. 1994. P. 747–758. DOI: 10.1117/12.190121.
21. *Palombi L., Cecchi G., Guzzi D., Lognoli D., Nardino V., Pippi I., Raimondi V.* Passive remote sensing of solar-induced fluorescence spectra of crude oil // *Int. J. Remote Sens.* 2012. V. 33, N 21. P. 6695–6709. DOI: 10.1080/01431161.2012.692835.
22. *Byfield V.* Optical remote sensing of oil in the marine environment: Doctoral dissertation. England: University of Southampton, 1998. URL: https://www.researchgate.net/profile/Valborg_Byfield/publication/35478105_Optical_remote_sensing_of_oil_in_the_marine_environment/links/0c9605358c5d8e498a000000.pdf (last access: 10.09.2020).
23. *Мольков А.А., Капустин И.А., Ермошкин А.В., Ермаков С.А.* Дистанционные методы определения толщины пленок нефти и нефтепродуктов на морской поверхности // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17, № 3. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-9-27.
24. *Салюк П.А., Стёпочкин И.Е., Голик И.А., Букин О.А., Павлов А.Н., Алексанин А.И.* Разработка эмпирических алгоритмов восстановления концентрации хлорофилла *a* и окрашенных растворенных органических веществ для дальневосточных морей из дистанционных данных по цвету водной поверхности // *Исследования Земли из космоса*. 2013. № 3. P. 45–57. DOI: 10.7868/S0205961413030044.
25. *Salyuk P.A., Stepochkin I.E., Bukin O.A., Sokolova E.B., Mayor A.Y., Shambarova J.V., Gorbushkin A.R.* Determination of the chlorophyll *a* concentration by MODIS-Aqua and VIIRS satellite radiometers in Eastern Arctic and Bering Sea // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52, N 9. P. 988–998. DOI: 10.1134/S0001433816090206.
26. *Bioucas-Dias J.M., Plaza A., Camps-Valls G., Scheunders P., Nasrabadi N., Chanussot J.* Hyperspectral remote sensing data analysis and future challenges // *IEEE Geosc. Remote Sens.* 2013. V. 1, N 2. P. 6–36. DOI: 10.1109/MGRS.2013.2244672.
27. *Siegel D.A., Wang M., Maritorena S., Robinson W.* Atmospheric correction of satellite ocean color imagery: The black pixel assumption // *Appl. Opt.* 2000. V. 39, N 21. P. 3582. DOI: 10.1364/AO.39.003582.
28. *O'Reilly J.E., Werdell P.J.* Chlorophyll algorithms for ocean color sensors – OC4, OC5 & OC6 // *Remote Sens. Environ.* 2019. V 229. P. 32–47. DOI: 10.1016/j.rse.2019.04.021.
29. *Leifer I., Lehr W.J., Simecek-Beatty D., Bradley E., Clark R., Dennison P., Hu Y., Matheson S., Jones C.E., Holt B., Reif M., Roberts D.A., Svejkovsky J., Swayze G., Wozencraft J.* State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill // *Remote Sens. Environ.* 2012. V. 124. P. 185–209. DOI: 10.1016/j.rse.2012.03.024.

I.E. Stepochkin, P.A. Salyuk, V.A. Kachur. Detection of oil pollution in the form of emulsion and individual films on the water surface of the Bering Sea using hyperspectral visible radiometry in August 2013.

We analyze the remote sensing reflectance spectra of seawater measured from the shipboard in the area of the Urals oil spill in the form of emulsion and individual films on the sea surface. The pollution was detected in the Bering Sea near Navarin Cape on August 4, 2013, during the voyage of the training ship "Professor Khljustin". *In situ* data from flow-through fluorometric measurements of the chlorophyll *a* and colored dissolved organic matter concentrations at a depth of 4 m, not influenced by contamination detected, were also used. The regression relations between remote and *in situ* measurements in clean and oil-polluted waters are analyzed. A preliminary version of the technique for detecting oil pollution on the sea surface, which is in emulsified form and in the form of small films of about 1 m² in area, is developed on the basis of remote measurements of the seawater spectra.