

ПРОБЛЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ПЛЕНОЧНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

Е.В. Островская, Е.В. Колмыков, О.И. Холина, К.И. Асаева

Каспийское море, богатое природными ресурсами, сегодня сталкивается с серьезными экологическими проблемами. В последние 20 лет Каспийский регион находится в центре внимания как один из значимых поставщиков нефти и газа на мировые рынки. Например, азербайджанское месторождение «Азери-Чыраг-Гюнешли» входит в десятку крупнейших в мире нефтяных месторождений [21]. На сегодняшний момент Каспийский регион поставляет на рынки около 3,29% мировых запасов нефти и 3,6% запасов газа [10].

Также активно развивается и российский морской нефтегазовый комплекс, растет число пробуренных поисковых, разведочных и добывающих скважин на морском шельфе, перспективных нефтегазоносных структур и т.д. Вместе с тем повышается вероятность возникновения аварийных разливов нефти, и усиливаются меры по защите морской среды от нефтяного загрязнения [7].

Поскольку Каспийское море является замкнутым водоемом, загрязняющие вещества, поступающие со стоком почти 130 рек, как правило, остаются в пределах его экосистемы. Добыча нефти и газа на его шельфе представляет собой дополнительную угрозу экологической безопасности региона. Любой разлив нефти и нефтепродуктов может привести к катастрофическим последствиям для морской биоты и населения прибрежной зоны. В связи с этим необходим постоянный мониторинг поверхности моря на наличие нефтяных разливов для того, чтобы быстро принять меры по ликвидации загрязнения и определить его источник [2, 11].

Нефтяные разливы образуют на поверхности воды пленки, которые могут быть обнаружены при дистанционном зондировании. В целях обнаружения пленочных загрязнений на лицензионных участках Северного Каспия уже несколько лет ведется высокочастотный космический мониторинг, в соответствии с которым спутниковые съемки выполняются со средней частотой 2 раза в 3 дня при помощи спутников RADARSAT-1 и RADARSAT-2. В результате с высокой надежностью могут быть обнаружены крупные пленочные загрязнения со средним временем существования на морской поверхности более 1 суток [2, 3].

По данным ИТЦ «СКАНЭКС» в период с 2010 по 2012 гг. было проведено 532 сеанса оперативной радиолокационной съемки акватории северной части Каспийского моря. Пленочные загрязнения антропогенного происхождения были обнаружены на 146 радиолокационных изображениях (27,4% от всех выполненных съемок). Геопространственный анализ

данных позволил предположить, что большинство пленочных загрязнений в северной части Каспийского моря группировалось в районах судоходных трасс и на подходных путях к портам. Происхождение некоторых, небольших по площади пленочных загрязнений может быть связано с естественными выходами углеводородов, однако идентификация таких источников требует проведения дополнительных исследований [2].

Несомненно, радиолокационный мониторинг имеет ряд неоспоримых преимуществ, таких как всепогодность и независимость от солнечного освещения, высокое разрешение, широкая полоса обзора, высокая чувствительность и т.д. Тем не менее, радиолокационные исследования пока не могут представить полной картины нефтяной пленки и достоверно определить ее источник. Некоторые исследователи оценивают вероятность правильного определения нефтяного происхождения пленочных образований при использовании определенных пошаговых процедур интерпретации космических снимков в диапазоне от 77 до 83% [8]. Это означает, что примерно в 20-25% случаев неизбежны ошибки при идентификации происхождения и источников пленок. Основной проблемой является то, что РЛИ не позволяет измерить параметры (в том числе химические), и особенно, толщину поверхностной пленки, что принципиально важно для определения ее происхождения [1, 3, 20]. Кроме того, обнаружение пленки возможно лишь в ограниченном диапазоне скоростей ветра (от 2-3 до 7-8 м/с).

Пленки на поверхности морей встречаются повсеместно, особенно в прибрежных акваториях и внутренних морях. По некоторым оценкам, около 10% поверхности Мирового океана покрыто пленочными образованиями различной природы [14]. Пленки на поверхности моря вызывают затухание поверхностного волнения, видимое на радиолокационном изображении как темное пятно выглаженной водной поверхности [5].

Задача идентификации нефтяных разливов усложняется существованием некоторых явлений, называемых «подобиями» нефтяных пятен, к которым относят не только органические пленки иной природы, но и некоторые типы льда («сало»), гидрологические фронты, дождевые ячейки, зоны апвеллинга, резкое ослабление приповерхностного ветра, поверхностные проявления океанических внутренних волн и т.п. [3, 5]. Все эти процессы и явления проявляются на радиолокационных изображениях в виде областей пониженного рассеяния и могут быть ошибочно отнесены к нефтяным загрязнениям. Основные типы подобий нефтяных загрязнений, их природа, условия возникновения и особенности проявления на радиолокационных снимках представлены в табл. 1.

Основные типы «подобий» нефтяных загрязнений морской поверхности и их радиолокационные проявления [3]

Геофизические явления	Форма проявления на радиолокационном изображении	Районы возникновения	Гидрометеорологические условия
Естественные биогенные пленки	Отражают структуру течений	Прибрежные зоны	Разрушаются при скорости ветра >7 м/с
Области локального ослабления ветра	Обширные зоны пониженного рассеяния	Повсеместно	Скорость ветра <2 м/с
Области ветровой тени	Ориентированные по направлению ветра области пониженного рассеяния вблизи побережья	Вблизи береговой черты при гористом рельефе побережья	Даже при сильном ветре вплоть до 15 м/с
Дождевые ячейки	Светлые ячеистые структуры с темным центром	Повсеместно	Интенсивные дожди и сильный ветер
Внутренние волны в океане	Узкие протяженные полосы квазипериодического усиления и ослабления рассеяния	Район свала глубин	Скорости ветра <8 м/с
Внутренние волны в атмосфере	Широкие полосы квазипериодического усиления и ослабления рассеяния	Повсеместно	Устойчивая стратификация приподнятого слоя атмосферы, сдвиговые течения в атмосфере
Молодой лед («сало»)	Обширные зоны пониженного рассеяния	Обычно вблизи береговой черты, на границе ледяного покрова	Холодное время года
Области цветения водорослей	Обширные компактные области пониженного рассеяния с четкими границами	Повсеместно	Теплое время года

Наибольшие сложности, безусловно, возникают при попытках отличить нефтяные загрязнения от пленок биогенных поверхностно-активных веществ на морской поверхности. Поскольку радиолокационные снимки отображают поверхностные пленки биогенного и антропогенного происхождения как темные пятна, возникает необходимость разработки методик, направленных на установление различий между ними [1, 3].

В данной работе мы попытаемся дать сравнительную характеристику физических и химических свойств поверхностных пленок различного происхождения для того, чтобы определить, какие дополнительные исследования необходимы для корректной идентификации происхождения пленочных образований, наблюдаемых на космических снимках.

Поверхностные пленки (слики) можно определить как видимые участки на поверхности воды, характеризующиеся сниженным волнением моря [6, 12]. Они представляют собой гладкие зеркальные полосы или пятна на поверхности океанов, морей или внутренних водоемов. Основной причиной появления сликов является аккумуляция на поверхности воды различных органических соединений, в том числе пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ), подавляющих капиллярные волны [13, 16]. К поверхностно-активным веществам относятся жирные кислоты, спирты, эфиры, молекулы которых содержат полярную гидрофильную группу, сильно притягивающуюся к воде и длинный гидрофобный "хвост".

Долгое время считалось, что пленки на водной поверхности имеют преимущественно антропогенное происхождение и состоят из веществ, попавших в морскую среду в результате деятельности человека. Такие пленки образуют не только нефть и продукты ее переработки, но и различные технические и бытовые масла, жирные кислоты и спирты, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), содержащиеся в бытовых, промышленных, сельскохозяйственных и канализационных стоках.

Однако на поверхности моря также встречаются пленки природного (биогенного) происхождения [16]. Подобные пленки могут быть образованы диатомовыми водорослями, содержащими в своих клетках частицы нефти [9]. Ряд исследований подтверждает формирование биогенной пленки на морской поверхности в результате жизнедеятельности планктона и морских животных [13, 18].

Пленки естественного происхождения могут состоять также и из сырой нефти, просачивающейся со дна моря, но обычно они состоят из поверхностно-активных веществ, получаемых в результате протекающих в морской среде биологических процессов [16].

Первое принципиальное различие пленок антропогенного и биогенного происхождения – толщина пленки. Вещества биогенного происхождения образуют на поверхности моря пленки в несколько мономолекулярных слоев, скапливаясь в районах с высокой биологической активностью [15].

Концентрация и состав поверхностных пленок изменчивы. При высокой скорости ветра волны разбивают пленки, и они могут полностью исчезнуть с поверхности моря. После штормов биогенные пленки покрывают большую часть акваторий в результате того, что при сильном ветре увеличивается секреция поверхностно-активных веществ планктоном, кроме того ПАВ поднимаются со дна моря в результате усиления турбулентности. Состав сликов-

также непостоянен, поскольку компоненты пленок исчезают в результате растворения, испарения, разложения и окисления [17].

Разлившаяся в море нефть также образует пленки различной толщины, так как нефть и продукты ее переработки представляют собой сложные смеси веществ. Благодаря своим физико-химическим свойствам нефть может существовать в океане довольно долгое время в виде пленок, эмульгированном виде или в виде агрегатов. В отличие от ПАВ/СПАВ, нефть никогда не растекается до мономолекулярных слоев, а ее пленки имеют большую толщину.

Проведенные Г. Гюнерфуссом исследования по моделированию сликов и нефтяных разливов на поверхности воды указывают на различия в химическом составе между этими двумя типами поверхностных пленок [15]. Для сравнения, нефтяные пленки состоят, главным образом, из алканов, цикло-алканов и ароматических компонентов – т.е. химических веществ, имеющих исключительно гидрофобную природу. Таким образом, небольшая капля парафинистой нефти с высокой температурой кипения, помещенная на поверхность воды, сохраняет форму капли, плавающей в углублении. В зависимости от количества нефти и ее вязкости, капля растекается по поверхности. Проведенные Гюнерфуссом эксперименты показали, что распределение сырой нефти и нефтепродуктов на поверхности воды определяется ее вязкостью и конкретными параметрами окружающей среды (течениями, направлением и скоростью ветра и волн). Тем не менее, окончательная толщина пленки будет в любом случае на порядки выше, чем мономолекулярная биогенная пленка. Гюнерфусс полагает, что толщина мономолекулярной пленки, состоящей из молекул с длиной цепи C_{16} – C_{18} , составляет примерно 2,4 – 2,7 нм [17]. Толщина же пленки, образуемой при разливах нефти на порядки выше, чем толщина мономолекулярной пленки [11, 15].

В таблице 2 приводится обобщение основных различий физических и химических свойств пленок антропогенного и биогенного происхождения.

Сравнительные характеристики биогенных пленок и разливов нефти
(адаптировано из [15])

Характеристики	Биогенные пленки	Разливы нефти
Химический состав	Поверхностно-активные вещества, состоящие из гидрофильной группы и гидрофобной составляющей	Алканы, цикло-алканы и ароматические УВ преимущественно гидрофобной природы, отсутствует гидрофильная группа
Распределение по поверхности	а) вещества распространяются по поверхности воды; б) слики формируются на поверхности воды	а) нефть разливается на поверхности воды; б) разливы формируются на поверхности воды
Толщина	Мономолекулярная пленка, обычно 2,4 – 2,7 нм	Более толстый слой, измеряется в мм, может достигать нескольких см при аварийном разливе больших количеств нефти
Происхождение	Биогенное (пленка образуется в результате жизнедеятельности планктона и рыб) и антропогенное	Почти всегда антропогенное, в некоторых случаях просачивание нефти со дна океана
Механизмы затухания волн	Затухание волн резонансного типа в области коротких гравитационных волн (затухание Марангони)	Затухание волн под воздействием поверхностного слоя более высокой плотности
Микробные и фотохимические трансформации компонентов	Трансформации протекают достаточно быстро – от нескольких часов до нескольких дней (растворимые, высокополярные вещества, которые исчезают в толще воды)	Трансформации протекают очень медленно – несколько месяцев (выветривание разливов нефти – формирование поверхностно-активных компонентов – формирование сликов непосредственно вокруг разливов)

В заключение отметим следующее. Проводимый в настоящее время спутниковый мониторинг Каспийского моря, по мнению многих исследователей, достаточно эффективен с точки зрения идентификации нефтяных разливов и их источников [2; 3; 5]. Однако, это, по-видимому, справедливо только в случае значительных количеств разлитой нефти (большого пространственного охвата пятна). Происхождение небольших разливов установить сложнее, поскольку их труднее отличить от других «подобий». Следовательно, идентификация происхождения пленочных образований не может базироваться исключительно на методах дистанционного зондирования, а требует их интеграции с другими видами мониторинга, в том числе химико-аналитическими и гидробиологическими исследованиями морской среды. Для корректной интерпретации радиолокационных данных необходимо привлекать различные сопутствующие измерения (ветер, течения, температура, содержание биомассы планктона и

т.д.), а также использовать имеющуюся информацию о геологии и геохимии района для более точного определения происхождения того или иного пятна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А.Ю. О различении пленочных загрязнений моря на радиолокационных изображениях морской поверхности. – 16 июля 2014. URL: www.scanex.ru/ru/publications/pdf/publication145.pdf.
2. Кузин А.В., Кучейко А.А., Колмыков Е.В., Филимонова Н.А., Антонюк А.Ю. Оперативный спутниковый мониторинг нефтяных пленок в северной части Каспийского моря // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе* – 2013. – №5. – С. 33-37.
3. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. *Комплексный спутниковый мониторинг морей России*. – М.: ИКИ РАН, 2011. – 480 с.
4. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Радиолокационные наблюдения поверхностных пленочных загрязнений в прибрежной зоне Черного и Азовского морей // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2007. – Т.1, № 4. – С. 317-324.
5. Митягина М.И., Чурюмов А.Н. Механизмы формирования радиолокационного сигнала в области нефтяного загрязнения на морской поверхности // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2006. – Т. 3, № 2. – С. 135-139.
6. Монин А.С., Красицкий В.П. *Явления на поверхности океана*. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. - 375 с.
7. Немировская И.А. *Нефть в океане (загрязнение и природные потоки)*. – М.: Научный мир, 2013. – 432 с.
8. Akar S., Süzen M.L., Kaymakci N. *Detection and object-based classification of offshore oil slicks using ENVISAT-ASAR images // Environmental Monitoring and Assessment*. – 2011. – V. 183. – P. 409–423.
9. Alpers W. *Surface Films. /Elements of Physical Oceanography: A derivative of the Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2009. – P. 218 - 220
10. *BP Annual Report and Accounts*. – BP, 2009. – 189 p.
11. *Caspian Sea: State of Environment*. 2010. – CEP & GREED Arendal, 2011. – 109 p.
12. Curtin T.B., Mooers C.N.K. *Observation and interpretation of a high-frequency internal wave packet and surface slick pattern // Journal of Geophysical Research*. - 1975. – V. 80, № 6. - P. 882–894.

13. Dietz R.S., Lafond E.C. *Natural Slicks on the Ocean*// *Journal of Marine Research*. - 1950. – V.9, № 2. -P. 69-76.
14. Girard-Ardhuin F., Mercier G., Collard F., Garello R. *Operational Oil-Slick Characterization by SAR Imagery and Synergistic Data* // *Journal of Oceanic Engineering*. – 2005. – V. 30, № 3. –P. 487-495.
15. Hühnerfuss H. *Basic physicochemical principles of monomolecular sea slicks and crude oil films* / *Marine Surface Films* (Edited by M. Gade, H. Hühnerfuss, G. Korenowski).– Springer, 2006. – P. 21-35.
16. Hühnerfuss H. *Oil on troubled waters – a hystorical survey* / *Marine Surface Films* (Edited by M. Gade, H. Hühnerfuss, G. Korenowski).– Springer, 2006.– P. 3-12.
17. Hühnerfuss H., Garrett W.D. *Experimental sea slicks: Their practical applications and utilization for basic studies of air-sea interactions*//*Journal of Geophysical Research*. – 1981. – V. 86, № C1. –P. 439–447.
18. Pogorzelski S.J., Kogut A.D. *Structural and thermodynamic signatures of marine microlayer surfactant films*// *Journal of Sea Research*. – 2003. – V. 49. – P. 347-356.
19. *Radar satellites: A new tool for pollution monitoring in coastal waters* / T. Wahl [et al.] // *Coastal Management*. – 1996. – V. 64. – P. 61-71.
20. Trivero P., Biamino W. *Observing marine pollution with Synthetic Aperture Radar* / *Geoscience and Remote Sensing New Achievements* (Edited by P. Imperatore and D. Riccio). – InTech, 2010. – pp. 397-417.
21. *World Energy Outlook.2008 - International Energy Agency, 2008.–578 p.*