

## Цикл нефтяного загрязнения от попадания в морскую среду до удаления

П. П. БЕСКИД, Е. Г. ДУРЯГИНА, Г. Т. ФРУМИН

Российский государственный гидрометеорологический университет,  
195196 Санкт-Петербург, Российская Федерация

Получена 12 мая 2011

Прослежен цикл нефтяного загрязнения в морской среде от попадания до удаления. Показана множественность источников загрязнения. Отмечено, что по характеру возникновения они подразделяются на естественные и антропогенные. Дана характеристика основных процессов, которым подвергается нефть в водной среде, негативно влияющих на проведение операций по ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов (ЛАРН).

*Ключевые слова:* нефть, нефтепродукты, нефтяное загрязнение, морская среда, морская поверхность, процесс.

Сырая нефть впервые была добыта в значительных количествах в 1880 г. С тех пор ее добыча постоянно увеличивалась. По объему и добыче нефти Россия занимает лидирующее положение в мире. К 2020 г. намечается увеличение добычи нефти и газоконденсата до 450–520 млн т год<sup>-1</sup> [1]. Очищенные нефтепродукты постоянно расходуются на удовлетворение более 60% мировых энергетических потребностей. В связи с этим практически невозможно применять продукты в таких количествах без некоторых потерь, количество которых постоянно растет, поэтому загрязнение моря нефтью и продуктами ее переработки является предметом серьезного беспокойства. Общее количество нефти и нефтепродуктов, попадающих ежегодно в океан, по оценкам разных исследователей составляет от 6 до 12 млн т. Поступление нефти в Мировой океан составляет примерно 0,23% от годовой мировой добычи нефти [2]. Она является одним из наиболее опасных загрязняющих веществ (до 3000 ингредиентов), многие из которых ядовиты для любых живых организмов.

По характеру возникновения загрязнения подразделяются на естественные и антропогенные (рис. 1). Основную массу загрязнений Мирового океана (порядка 95 %) составляют источники антропогенного происхождения. К важнейшим антропогенным источникам нефтяного загрязнения относятся:

- морские — морской транспорт, военные корабли, суда различного назначения, трубопроводы, установки и устройства, используемые при разработке ресурсов морского дна и его недр;

- наземные — реки, озера и другие водные системы, куда загрязняющие вещества попадают с грунтовыми водами, а также в результате сброса сточных вод с различных береговых объектов;

- атмосферные — различные промышленные предприятия, транспортные средства и другие объекты, откуда могут происходить выбросы в атмосферу углеводородных соединений.

Основными природными источниками нефтяного загрязнения морской среды являются выходы нефти на дне моря и менее значительными источниками — эрозионные процессы.

Различают несколько групп источников загрязнения Мирового океана (табл. 1 [3]), классификация которых представлена на рис. 1.

Присутствие нефти в море (в виде нефтяных пленок на поверхности воды, мазутных отложений на дне бухт и вдоль побережий, дрейфующих в открытом море нефтяных комков и шариков) уже давно стало привычным атрибутом практически всех морских регионов. В настоящее время в Мировом океане практически нет такой области, где отсутствовало бы нефтяное загрязнение. Фоновые уровни содержания нефтяных углеводородов в морской среде изменяются в очень широких пределах:  $10^{-5}$ – $10^1$  мг л<sup>-1</sup> в воде и  $10^{-1}$ – $10^4$  мг кг<sup>-1</sup> в донных осадках в зависимости от многих природных и техногенных факторов. Максимальные концентрации тяготеют к прибрежным и внутренним морским водам, зонам интенсивного судоходства и иной хозяйственной деятельности, а также к районам выхода (про-



Рис. 1. Источники поступления нефти в морскую среду

сачивания) углеводородов из месторождений на шельфе.

При попадании нефти или нефтепродуктов на водную поверхность ее взаимодействие с морской средой начинается сразу. Часть нефти начинает испаряться, некоторая ее часть, которая осталась на поверхности воды, начинает перемещаться по этой поверхности под действием разных факторов, а оставшаяся часть переходит в толщу воды, образуя дисперсную систему из воды и нефтепродуктов. С первых же секунд контакта нефти и ее продуктов с морской средой развивается сложнейшая картина их превращений, ход, длительность и результаты которых зависят от свойств и состава самой нефти, а также от условий окружающей среды. При этом различают две группы взаимосвязанных процессов:

- процессы переноса нефти на поверхности и в толще воды (растекание, дрейф, седиментация, затопление);
- процессы выветривания, в ходе которых меняются физические и химические свойства нефти (испарение, растворение, диспергирование, эмульгирование, окисление, биодegradация).

Главными чертами этих процессов являются динамизм (особенно на первых стадиях) и сочетание физических, химических и биологических процессов рассеяния и трансформации компонентов нефти (вплоть до их полного исчезновения как исходных субстратов) [4]. Совокупность

основных процессов, которым подвергается нефть в водной среде, показана на рис. 2.

Протекание указанных процессов приводит к изменению структуры и свойств слоя разлитых нефтепродуктов. В процессе испарения из пятна разлива улетучиваются легкие составляющие нефти или нефтепродуктов и остаются более тяжелые. За первые сутки испаряются почти все углеводороды, которые в данных условиях аварийного разлива способны испариться. На рис. 3 [5] показано преобладание основных процессов, происходящих с разлитой на воде нефтью в первые сутки после ее разлива.

Испарение части нефти приводит к изменению ее свойств в пятне разлива и оказывает влияние на последующее поведение пятна. Содержание нефти в воде в результате таких природных процессов, как испарение и растворение, изменяется. Происходит образование эмульсий, часть нефти усваивается живыми организмами и выпадает в осадок. Состав нефти, находящейся в воде, постоянно меняется. Последовательность и продолжительность процессов переноса и трансформации нефти в морской среде показана на рис. 4 [6].

Ни один из этих процессов не происходит автономно, все они взаимосвязаны между собой. Благодаря этим процессам, нефть быстро теряет свои первоначальные свойства, распределяется в толще воды, а ее количество уменьшается в результате рассеяния и разложения вплоть до исчезновения исходных и промежуточных соеди-

Таблица 1. Источники поступления нефти в Мировой океан

Источники загрязнения	Общее количество, млн. т·год <sup>-1</sup>	Доля, %
Транспортные средства:	2.13	34.9
обычные перевозки	1.82	30.0
катастрофы	0.3	4.9
Вынос реками	1.9	31.1
Попадание из атмосферы	0.6	9.8
Природные источники	0.6	9.8
Промышленные отходы	0.3	4.9
Городские отходы	0.3	4.9
Отходы прибрежных нефтеочистительных заводов	0.2	3.3
Добыча нефти в открытом море:	0.08	1.3
обычные операции	0.02	0.3
аварии	0.02	1.0

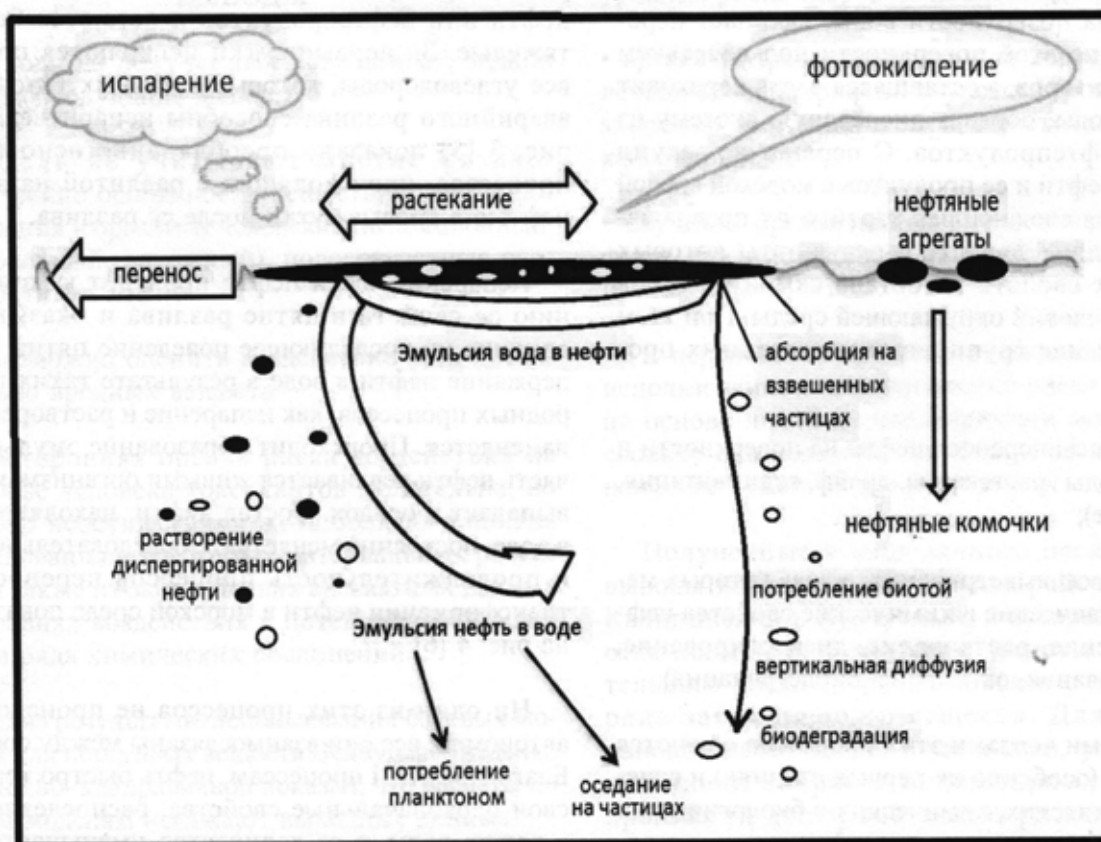


Рис. 2. Совокупность основных процессов, которым подвергается нефть в водной среде

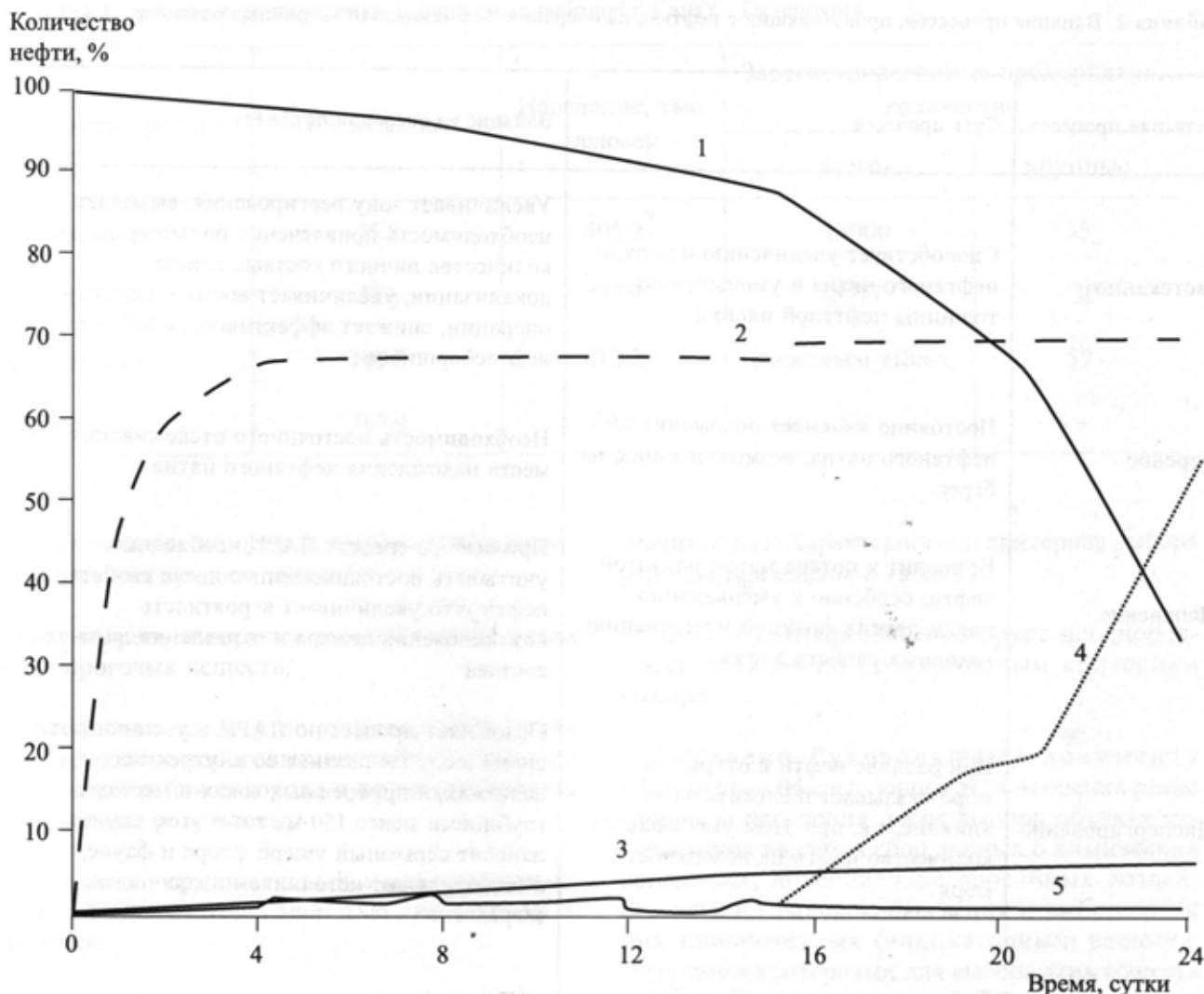


Рис. 3. Преобладание основных процессов, происходящих с разлитой на воде нефтью в первые сутки после разлива: 1 – переход в водную фазу; 2 – естественное диспергирование; 3 – поверхностное растекание; 4 – затопление; 5 – испарение

нений с образованием  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , в результате чего происходит самоочищение водной среды от попавших в нее нефтепродуктов, что в конечном счете приводит к исчезновению нефтяных пленок с поверхности моря и остатков нефти с морских берегов.

Все эти процессы негативно влияют на эффективность проведения операций по ЛАРН. Знание их, служит гарантией правильного выбора методов и средств ликвидации нефтеразливов. В табл. 2 показано влияние этих процессов на операции по ликвидации аварийных разливов нефти.

При разливах нефти на море при всем разнообразии сценариев развития событий, основными вариантами являются всего два:

- нефтяное пятно будет находиться в отдалении от берега или
- нефть войдет в соприкосновение с прибрежными водами и береговой линией.

В первом случае под влиянием ветра, течений, турбулентного перемешивания и других гидродинамических процессов будет происходить перенос нефтяного пятна, и биологические эффекты сведутся к локальным, быстро восстанавливаемым нарушениям на поверхности моря и в пелагиали. Во втором случае последствия для берега и биологических ресурсов района могут быть весьма существенными. Выход нефтяного пятна на берег многократно увеличивает тяжесть последствий. Это объясняется тем, что именно в береговой зоне расположена кормовая база и

Таблица 2. Влияние процессов, происходящих с нефтью, на операции по ликвидации аварийных разливов

Название процесса	Суть процесса	Влияние на операции по ЛАРН
Растекание	Способствует увеличению площади нефтяного пятна и уменьшению толщины нефтяной пленки	Увеличивает зону реагирования, вызывает необходимость привлечения большего количества личного состава, средств локализации, увеличивает время проведения операции, снижает эффективность работы нефтесборщиков
Перенос	Постоянно изменяет положение нефтяного пятна, возможен вынос на берег	Необходимость постоянного отслеживания места нахождения нефтяного пятна
Испарение	Приводит к потере массы разлитой нефти, особенно к уменьшению массы легких фракций и изменению исходных свойств нефти	При выборе средств ЛАРН необходимо учитывать постоянно меняющиеся свойства нефти, что увеличивает вероятность возникновения пожара и отравления личного состава
Диспергирование	При разливе нефти в открытом море оказывает положительное влияние, т.к. при этом уменьшается количество нефти на поверхности моря	Осложняет процесс по ЛАРН и увеличивает время в случае разлива во внутренних водоемах, в прибрежных зонах и местах с глубинами менее 150 м., т.к. в этом случае наносит серьезный ущерб флоре и фауне, а также служит источником вторичного загрязнения
Эмульгирование	Значительно увеличивает объем нефтезагрязнения, изменяет плотность и температуру вспышки нефти	Необходимо учитывать при расчете средств сбора нефти, а также количества емкостей временного хранения собранной нефти
Осаждение	Приводит к накоплению на дне водоема тяжелых фракций нефти, которые служат источником вторичного загрязнения и оказывают негативное влияние на флору и фауну водоема	Удалять сложно, а часто невозможно
Окисление	Незначительно влияет на свойства и поведение разлитой нефти	Незначительно
Растворение	Приводит к токсическому заражению воды	Усложняет операции по ЛАРН, т.к. имеет значительные экологические последствия
Биоразложение	Медленный процесс, может использоваться в качестве метода доочистки водоемов от нефти	Оказывает незначительное влияние на ЛАРН

Таблица 3. Классификация морской береговой линии по степени уязвимости к нефтяному загрязнению

Способность к самоочищению	Характеристика и тип береговой линии	Характеристика процессов
Высокая (тип I)	Открытые скалистые и каменные берега	За счет волнового и прибойного смыва нефть удаляется в течение нескольких недель. Очистки береговой линии не требуется
Средняя (тип II)	Аккумулятивные берега с пляжами из мелких и среднезернистых песков	Нефть аккумулируется на поверхности мелких песков и в верхних слоях более крупных песков, сохраняется в течение нескольких месяцев и может быть удалена механическими способами на мелкопесчаных пляжах
Низкая (тип III)	Абразивные берега с пляжами из крупного песка, гравия и гальки	Нефть быстро проникает в отложения на глубины до 1 м и может сохраняться годами
Очень низкая (тип IV)	Абразивные участки берега с пляжами, сложенными валунно-галечниковым и гравийным материалом	Существуют условия для быстрого накопления и захоронения нефти в течение нескольких лет. При сильном загрязнении могут возникать асфальтовые корки

места размножения большинства промысловых видов морских организмов. Выход нефти на берег делает невозможным также нормальное функционирование прибрежных рекреационных зон. Очистка пляжей требует не только значительных финансовых затрат, но и времени.

При соприкосновении нефтяного пятна с береговой линией основные процессы аккумуляции, перемещения и трансформации нефти будут развиваться в литоральной и sublиторальной области, подверженной воздействию ветровых волн, штормов, приливов и отливов. При выносе нефтяного пятна на берег основные проявления загрязнения природной среды обычно возникают лишь до максимальной границы заплеска береговой полосы волнами прибоя. Однако именно эта зона контакта трех сред — атмосферы, воды и донных отложений нередко представляет собой зону сосредоточения жизни и ее разнообразных проявлений. Воздействию разлитой нефти здесь могут подвергаться практически все основные компоненты не только морских, но и прибрежных экосистем. Последствия воздействия будут зависеть от степени загрязнения нефтью и от продолжительности воздействия. Способность к

самоочищению береговой линии будет зависеть в первую очередь от геоморфологии (изрезанности) берегов, их геологической структуры и литологических характеристик береговых отложений (состав, дисперсность), а также от энергии волновых и приливных процессов. При переходе от открытых каменных берегов к песчано-гравийным пляжам и закрытым бухтам вредное воздействие нефти и нефтепродуктов резко возрастает [7].

В табл. 3 [6] приведена классификация морской береговой линии, построенная по критериям ее уязвимости к потенциальному нефтяному загрязнению с учетом морфологии берегов, гранулометрического состава береговых отложений и гидродинамики прибрежной зоны.

К числу факторов, которые должны повышать скорость природного самоочищения морских берегов в случаях их контакта с полями нефтяных разливов, следует отнести открытость к морю береговой линии и интенсивное воздействие ветровых волн, штормов, сгонно-нагонных и приливно-отливных процессов, которые способствуют диспергированию и разрушению нефти.

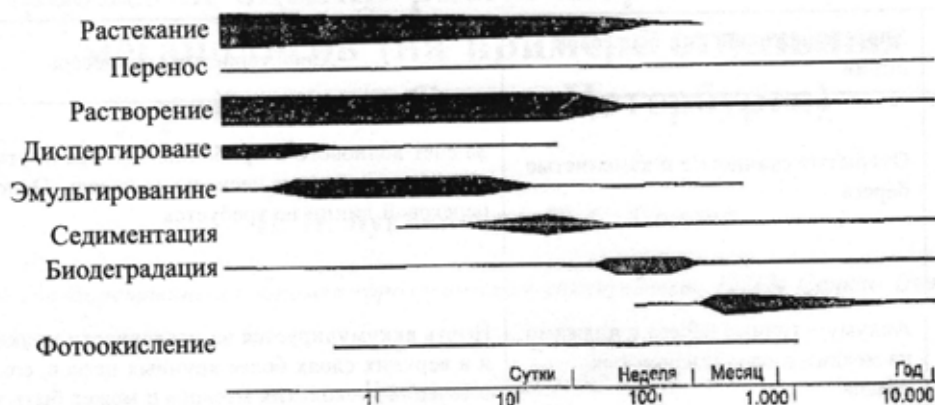


Рис. 4. Последовательность, продолжительность и относительный масштаб процессов переноса и трансформации нефти в морской среде (длина линий отражает длительность процессов, ширина линий соответствует относительной интенсивности процессов)

Нефть и нефтепродукты, попавшие в морскую среду, оказывают влияние на морские организмы. При попадании одной тонны сырой нефти на морскую поверхность она растекается в пятно площадью до 30 км<sup>2</sup> при средней толщине пленки несколько сотых микрон. Такая пленка помимо прямого токсического воздействия на морские организмы, обитающие на границе раздела океан – атмосфера, оказывает и побочное действие, нарушая энерго-, массо-, газообмен между атмосферой и океаном, меняя физико – химические характеристики морской поверхности. В ряде случаев такое побочное воздействие на морскую экосистему может стать сильнее прямого токсического воздействия нефти и нефтепродуктов на морские организмы.

О возможных последствиях нефтяных разливов для биоты литоральной и sublиторальной зоны можно судить по осредненным оценкам, приведенным в табл. 4 [6].

Диспергированная нефть практически не оказывает влияния на морфологию и состав отложений береговой зоны. Диспергирование нефти может быть хорошим способом защиты побережья или чувствительных ресурсов, находящихся по ветру от разлива нефти, поскольку использование диспергентов сводит к минимуму сорбцию нефти в осадках. В естественных условиях применение диспергентов при разливах нефти препятствует ее аккумуляции и снижает угрозу для береговой зоны.

Как следует из статистики, большинство аварийных ситуаций и нефтяных разливов при-

ходит на прибрежную зону. Вероятность выноса нефти на берег в таких случаях зависит от характера разлива (объем, расстояние от берега и пр.) и конкретных гидрометеорологических условий в данном месте и в данное время, в первую очередь от силы ветра и течений. При всей неопределенности прогноза таких событий в большинстве случаев вынос нефтяного пятна на берег достаточно вероятен.

При больших разливах существует вероятность обратного смыва вынесенной на берег нефти в sublиторальную зону, где уровни нефтяного загрязнения донных осадков обычно на порядок ниже по сравнению с береговыми и литоральными отложениями.

Чаще всего оба этих сценария развиваются одновременно, и это особенно вероятно для ситуаций, при которых аварийный разлив происходит в непосредственной близости от берега.

Влияние нефти на морские организмы и растительность определяется их видом, типом нефти и нефтепродуктов и рядом других факторов. Острая токсическая реакция морских организмов и растений вызывается присутствием в воде легких ароматических углеводородов и их замещенных производных, содержащихся в нефти и нефтепродуктах. Эти соединения являются растворимыми и составляют менее 5 % массы сырой нефти, однако, в таких нефтепродуктах, как бензин и керосин, их содержание может достигать 20%.

В современных международных соглашениях подразумевается, что разлитая в результате ава-

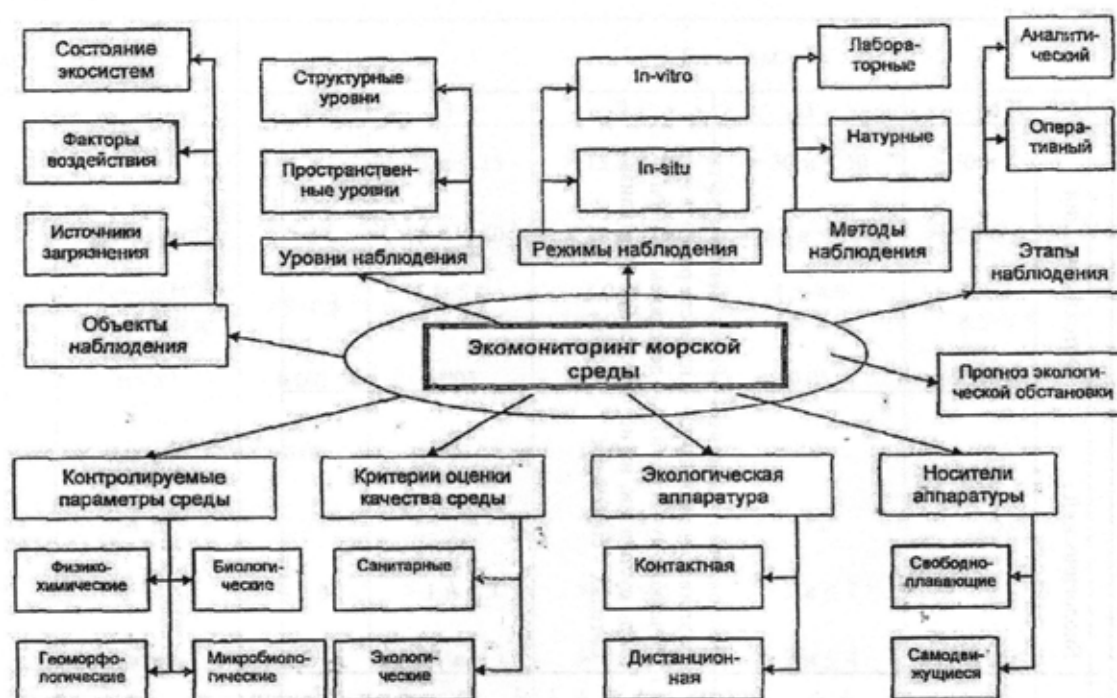


Рис. 5. Структура экомониторинга

рии нефть должна быть собрана и эвакуирована за пределы акватории, однако если пятно вышло на берег, к этим мероприятиям добавляется очистка грунтов приурезовой зоны. В связи с этим встает проблема раннего обнаружения разливов нефтепродуктов, связанных как с преднамеренным загрязнением, так и произошедших в результате техногенных катастроф, и удаления их с водной поверхности. Отсюда вытекает необходимость в организации и проведении экологического мониторинга как гаранта поддержания необходимого уровня экологической безопасности.

Основными задачами экологического мониторинга океана является создание системы наблюдений за источниками и факторами антропогенных воздействий и биологическими эффектами в морских экосистемах, а также определение допустимой нагрузки на экосистемы (разрабатываемой на основе оценки, анализа и прогноза состояния океана). Общая структура экомониторинга морских акваторий приведена на рис. 5 [8].

Для мониторинга нефтяных загрязнений необходимо проведение непрерывных наблюдений во времени, исходя из продуманного распределения измерительных средств в пространстве, поэтому информационная система о состоянии

водной поверхности должна быть дистанционной, распределенной, многосенсорной и автоматизированной

При ликвидации разлива нефти выделяют две главные задачи: быстрая ликвидация разлива за счет максимального ограничения распространения нефти на водной поверхности и сбор разлитой нефти с последующей ликвидацией радужной пленки. Весь комплекс мероприятий, направленных на защиту окружающей среды при аварийных разливах нефти, можно условно разделить на технические и организационно-правовые. Технические мероприятия непосредственно обеспечивают ликвидацию нефтяного разлива. Организационно-правовые мероприятия способствуют такой административной и юридической организации процесса добычи и транспортировки нефти, при которых ее утечки на всех этапах минимальны. За последние несколько лет накоплен значительный материал по разработке и использованию различных методов борьбы с нефтяными разливами в море [9]. В табл. 5 приведена классификация методов удаления нефтепродуктов.

Современный арсенал способов, имеющихся в распоряжении служб по борьбе с нефтяными разливами, весьма разнообразен и включает



Таблица 5. Классификация методов удаления нефтепродуктов

		Метод		
Самоочищение	Механический	Физико-химические	Биологический	Фотохимический
Испарение Эмульгирование Диспергирование Растворение Фотоокисление	<p>Локализация разлива: статический, динамический методы</p> <p>Сбор с помощью всасывающих устройств: вакуумных, с плавающими насосами</p> <p>Сбор с помощью переливных (пороговых) устройств: с тонкими сетками, с постоянным порогом, с регулируемым порогом</p> <p>Сбор с помощью гидродинамических устройств (с использованием центробежных сил: гидроциклона</p> <p>- вихревой воронки</p> <p>- устройства для образования большого числа микровихрей</p>	<p>Сжигание.</p> <p>Сбор с помощью адгезионных устройств (скиммеров): конвейерных, с вращающимся барабаном, с вращающимися дисками.</p> <p>Сорбционный:</p> <p>рассеивание и сбор дисперсных сорбентов, со сбором и последующим сбором формованных рулонных сорбентов, с конвейерами со щеточным или сорбирующим покрытием, непрерывной сорбирующей трос, шваброй, жидких, на твердых носителях.</p> <p>Осаждение с использованием реагентов – диспергаторов.</p> <p>С использованием реагентов - ступитителей.</p>	<p>Разложение на месте разлива микробиологической культурой: в виде суспензии, на носителях - сорбентах</p>	<p>Разложение нефти на месте разлива под действием солнечного света и катализаторов</p>

в себя широкий набор различных методов и технологий. Наибольшей эффективностью отличаются механические способы локализации, сбора и удаления нефти, а также новые химические препараты для диспергирования пленочной нефти в море и на берегу. В некоторых случаях бывает трудно провести грань между ними, так как вещества, применяемые для удаления нефти механическим путем, перед этим обрабатываются химикатами. Все эти методы и средства применяются в рамках стратегии и планов реагирования на нефтяные разливы, которые разрабатываются сейчас во многих прибрежных странах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Технология переработки нефти, В 2-х частях, Часть первая*, Ред. О. Ф. Глаголева и В. М. Капустин, М.: Химия, КолосС, 2007, 400 с.
2. Гольдберг, В.М., Зверев, В.П., Арбузов, А.И. и др., *Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия*, М.: Наука, 2001, 125 с.
3. Иванов, В.И. и Фадин, И.М., *Инженерная экология и экологический менеджмент*, М.: Логос, 2003, 527 с.
4. Бескид, П.П. и Дурягина, Е.Г., Характеристика процессов трансформации нефти в морской среде и их влияние на операции по ликвидации аварийных разливов нефти, *Эксплуатация морского транспорта*, 2011, 1(63), 71–75.
5. *Техника и технология локализации и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов*, СПб: Профессинал, 2008, 819с.
6. Патин, С.А., *Нефть и экология континентального шельфа*, М.: ВНИРО, 2001, 244 с.
7. Алешин, И.В., *Охрана окружающей среды при освоении ресурсов Мирового океана*, СПб.: СПбГМТУ, 2005, 88 с.
8. Бескид, П.П. и Дурягина, Е.Г., Влияние нефтеразливов на морскую среду и ее обитателей, *Флотэксперт*, 2010, 5, 34–38.
9. Каменщиков, Ф.А. и Богомольный, Е.А., *Удаление нефтепродуктов с водной поверхности и грунта*. М.: Институт компьютерных исследований, Ижевск: R&C Dynamics, 2006, 525с.

## Oil pollution cycle from inflow into the sea till full removal

P.P. Beskid, E.G. Duryagina & G.T. Frumin

*Russian State Hydrometeorological University, 195196 St. Petersburg, Russia*

The cycle of oil pollution in the sea environment from inflow till elimination was considered. Plurality of sources of pollution was shown. It was noted that they subdivided to natural and anthropogenic ones, due to the character of their appearance. The basic processes, which oil is subjected in the water environment to, were stated. Those of them negatively affected the oil spill elimination were characterized.

*Key words: oil pollution, oil spill, the sea environment, oil elimination.*

Бескид Павел Павлович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой Морских информационных технологий, Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ). Область научных интересов: методы обработки информации в многомерных системах мониторинга окружающей среды.

Григорий Тевелевич Фрумин, д.х.н., профессор, кафедра Экологии, Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ). Область научных интересов: токсикология, эвтрофикация и химическое загрязнение природных вод, оценка рисков.

Елена Георгиевна Дурягина, старший преподаватель, кафедра Химии природной среды, Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ). Область научных интересов: гидрохимия, химическое загрязнение природных вод.