

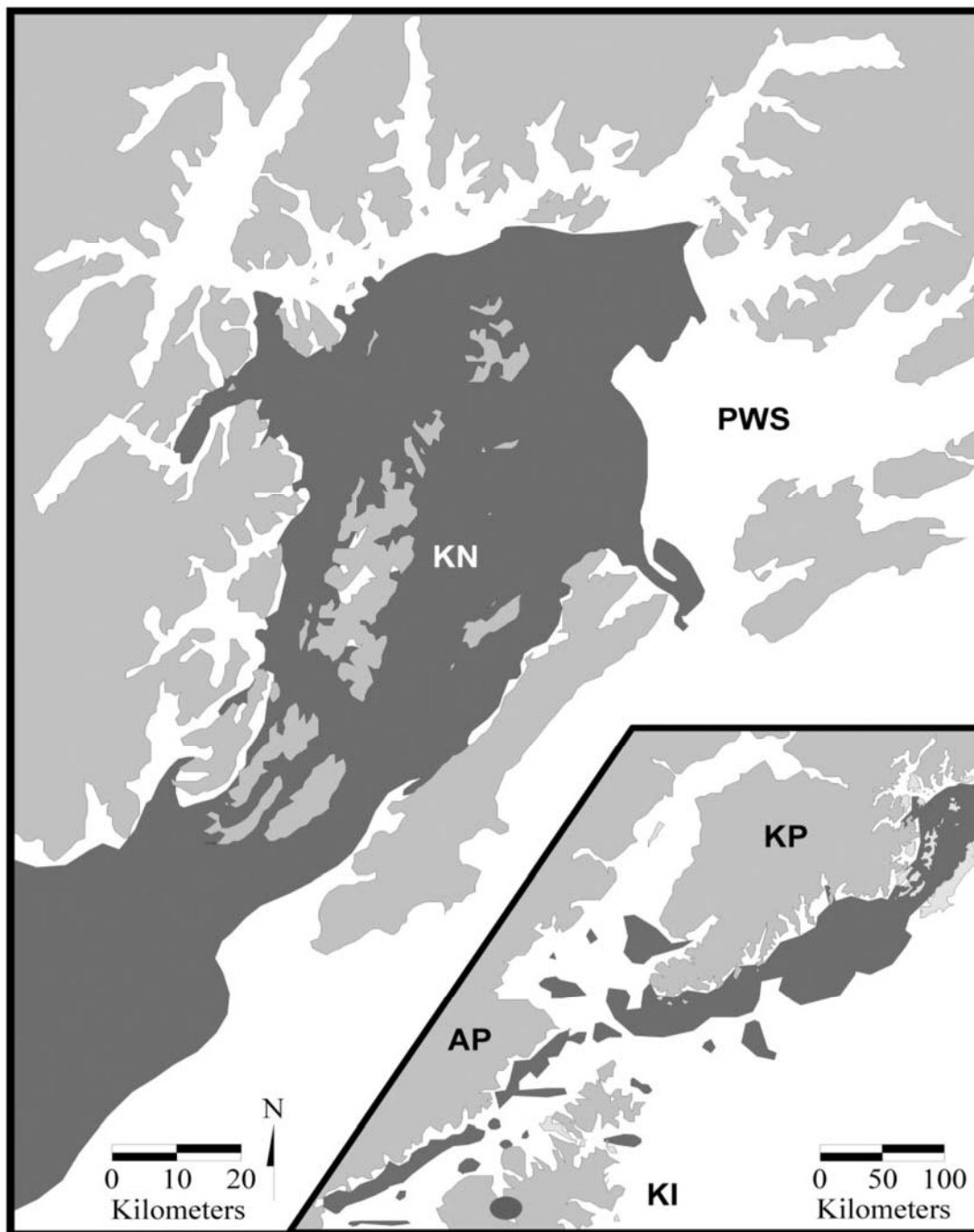
# Обзор

## Долгосрочные последствия разлива нефти танкером Exxon Valdez для экосистемы региона

Чарли Х. Петерсон<sup>1\*</sup>, Стэнли Д. Райс<sup>2</sup>, Джеффри У. Шорт<sup>2</sup>, Дэниел Эслер<sup>3</sup>,  
Джеймс Л. Бодкин<sup>4</sup>, Бренда И. Бэллэчей<sup>4</sup>, Дэвид Б. Айронс<sup>5</sup>

*Последствия для экосистемы от разлива нефти танкером Exxon Valdez в заливе Принс-Уильям в 1989 году продемонстрировали, что существующие ныне оценки экологических рисков при разливе нефти в океане, как и других токсичных веществ, нуждаются в серьезном пересмотре. Прежде было принято исчислять прямой ущерб биологической популяции почти исключительно объемом летальности непосредственно после события. Тогда никто и предполагать не мог, что в прибрежной экосистеме Аляски столь длительное время под поверхностным слоем воды будут сохраняться токсичные нефтяные субстанции, оказывающие губительное влияние на живые организмы даже на сублетальном уровне. Продолжают сокращаться популяции видов, под влиянием косвенных факторов задерживается процесс восстановления экосистемы. Для того, чтобы осознать и окончательно предсказать хронические, замедленные и косвенные долгосрочные угрозы и ущерб живой природе, необходимо срочно разработать токсикологический подход на базе экосистемы.*

До разлива нефти танкером Exxon Valdez данные, применяемые для моделей конструктивного анализа рисков при прогнозировании ущерба экологии, подвергшейся воздействию углеводородов, ограничивались выборочным, чаще всего, краткосрочным мониторингом состояния среды после предшествующих разливов нефти и методами тестирования на токсичность с допустимыми лабораторными таксонами (1). После того как 24 марта 1989 года Exxon Valdez столкнулся с рифом Блай (Bligh) в северной части залива Принс-Уильям, объемы вылившейся из танкера сырой нефти, площади загрязнения береговой полосы и очевидная всем массовая гибель живых организмов привели даже по очень сдержанным оценкам к беспрецедентной экологической катастрофе невиданных масштабов, последствия которой сказываются и сегодня, по прошествии 14 лет после того рокового дня (2-5). Вылившиеся из танкера 42 миллиона литров нефти с аляскинского месторождения Норт-Слоп загрязнили не менее 1990 км побережья Аляски, сохранявшего до катастрофы свою первозданную чистоту. Самый жестокий урон был причинен заливу Принс-Уильям, но нефть распространилась еще дальше – более чем на 750 км к юго-западу вдоль полуострова Кенай, архипелага Кодьяк и полуострова Аляска (Илл. 1). После многих лет исследовательских работ пришло новое понимание фактора долгосрочного биологического ущерба и восстановительных процессов в прибрежной экосистеме, когда-то изобиловавшей морскими млекопитающими, морскими птицами и популяциями крупной рыбы (2-5).



**Илл.1** Карта распространения нефти и береговой линии (выделено черным цветом) после выброса сырой нефти из танкера Exxon Valdez, наскочившего на риф Блай (Bligh) в северной части залива Принс-Уильям. Нефтяное пятно смещалось к юго-западу, залив берега острова Найт (KN) и других островов залива, а также – полуострова Кенай (KP), архипелага Кодьяк (KI) и полуострова Аляска (AP).

Задержки восстановительных процессов и сохранение крайне опасного долгосрочного ущерба живой природе становятся понятны в контексте перспективной экотоксикологии. (6) Экосистема склонна скорее провоцировать экотоксикологию на взаимодействие между абиотическими и биологическими компонентами, чем содействовать оздоровлению каждого из этих компонентов в отдельности и оценивать краткосрочные воздействия на эти сферы (7). Между финансируемой компанией Exxon специалистами и государственными аналитиками (8) существуют разногласия и недопонимания по поводу динамики взаимодействия сразу многих факторов влияния на живую природу. Хотя эти разногласия почти не повлияли на окончательные выводы: сохранившаяся и по истечении

более десяти лет нефть в удивляющих специалистов объемах стала активно участвовать в биохимических процессах, вызывая хроническую ущербность биосферы и оказывая долгосрочное воздействие уже на уровне популяции. Индуцирование долгосрочного воздействия осуществляется наличием трех главных факторов: (i) хроническое содержание нефти в среде, биологическая уязвимость и массовое вредное воздействие на виды, обитающие на аллювиальном мелководье; (ii) отложенное вредное воздействие на популяции на сублетальном уровне, подвергающее опасности здоровье, развитие и воспроизводство этих видов; и (iii) косвенное влияние трофических каскадов и факторов взаимодействия, проявляющих себя во многих формах и за пределами острой фазы летальности.

### ***Острая фаза летальности***

После выброса сырой нефти из танкера Exxon Valdez в воды залива Принс-Уильям (PWS) острая летальность в принципе была предсказуема опытом других разливов нефти. Поскольку морские млекопитающие и птицы постоянно соприкасаются с поверхностью воды, естественно, что нефть на поверхности моря стала для них смертельно опасной угрозой (2, 6). Загрязнение нефтью меха животных и перьев птиц быстро приводило к гибели из-за гипотермии, удушья, утопления, заглатывания токсичных углеводородов. В течение нескольких дней после катастрофы была зарегистрирована гибель от 1000 до 2800 каланов (9) и беспрецедентного количества морских птиц – около 250.000 особей (10). Установлено, что 302 безухих тюленя (*Phoca vitulina*) – гладкошерстных морских млекопитающих – погибли не из-за загрязнения нефтью мехового покрова, а в результате вдыхания токсичных испарений, вызвавших отеки головного мозга, стресс и полную потерю ориентации. Массовая гибель отмечалась также среди *macroalgae* и бентосных беспозвоночных на загрязненных нефтью берегах под воздействием химических токсинов, а также по причине их физического срыва с места обитания мощными струями воды, которыми обрабатывались берега после разлива (5, 7).

### ***Присутствие нефти: секвестрация экосистемы***

Только на ранних стадиях перемещения и обработки углеводородов нефти удалось добиться ожидаемых результатов (11). Около 40-45% всей массы нефти было выброшено в 1989 г. на берега PWS протяженностью 787 км; еще 7-11% от общей массы нефти переместились к берегам Аляскинского залива, загрязнив их на протяжении 1203 км (11, 12). Около 2% осталось на литоральных берегах PWS и по истечении 3,5 лет после разлива. Это проявилось в форме экспоненциального распада с интенсивностью  $-0,87$  в год<sup>-1</sup>, что, в свою очередь привело к потере 58% в течение всего года. Неожиданно (3) с течением времени дисперсия и деградация снизилась, т.к. большая часть нефти, оставшейся после 1992 года, была секвестрирована на площадях, благодаря применению физических заграждений, технологий оксигенации и фотолиза (12). При проведении в 2001 году исследований литоральной береговой линии PWS было обнаружено 55.600 кг слегка выветренной под влиянием погодных условий нефти с Exxon Valdez в литоральных подповерхностных отложениях и, возможно, такое же количество разложившейся поверхностной нефти на литоральных отметках высокой воды, а также - минимально подвергшейся воздействию погодных условий подповерхностной нефти на литоральных отметках низкого уровня воды (13). Это определяет скорость разложения нефти в период с 1992 по 2001 г.г. всего лишь от  $-0,22$  до  $-0,30$  в год<sup>-1</sup> (годовая потеря 20-26%) от общего объема 806.000 кг, зафиксированного на берегах PWS в 1992 году.

<sup>1</sup> University of North Carolina at Chapel Hill, Institute of Marine Sciences, Morehead City, NC 28557, USA.

<sup>2</sup> National Marine Fisheries Service, National Oceanographic and Atmospheric Administration, Alaska Fisheries Science Center, Auke Bay Laboratory, Juneau, AK 99801–8626, USA.

<sup>3</sup> Centre for Wildlife Ecology, Department of Biological Sciences, Simon Fraser University, 8888 University Drive, Burnaby, BC, Canada, V5A 1S6.

<sup>4</sup> U.S. Geological Survey, Alaska Science Center, 1011 East Tudor Road, Anchorage, AK 99503, USA.

<sup>5</sup> U.S. Department of Interior, Fish and Wildlife Service, 1011 East Tudor Road, Anchorage, AK 99503, USA.

*Для отправки корреспонденции: E-mail: [cpeters@email.unc.edu](mailto:cpeters@email.unc.edu)*

«Острова безопасности» из осадочных горных пород тормозили деградацию и устойчиво секвестрировали токсичную нефть в литоральной зоне берегов, покрытых крупным галечником, где геоморфологическая защитная оболочка, создаваемая валунами и крупными булыжниками, сдерживала воздействие морских волн (12). Таким же образом часть нефти попала в ловушки под мидиевыми банками, что обеспечило ее попадание во многие пищевые цепочки (14). Нефть попала и задержалась под крупными камнями и галечником в устьях ручьев, воздействовала на биосферу и привела к гибели эмбрионы в отложениях икры лососевых рыб, по меньшей мере, в нерестовый сезон 1993 года (16). Таким образом, мы видим: сильно загрязненные нефтью осадочные породы сформировали собой своеобразную защиту подповерхностных скоплений, секвестрируя нефть от потерь и воздействий погодных агентов в литоральной зоне обитания видов, пищу которых составляют икра рыб и беспозвоночные (кормовые ресурсы каланов, морских уток и прибрежных птиц).

### *Долгосрочное воздействие на популяцию*

*Хроническое воздействие на придонные виды.* Хроническое воздействие скоплений нефти в течение ряда лет после разлива на обитающие в придонной зоне организмы было выявлено с помощью биологических индикаторов в рыбе (17), каланах (18) и морских утках (19), чья кормовая база тесно связана с донными отложениями, содержащими икру рыб и другую пищу для этих животных. Это влияние нефтяных токсинов в течение ряда лет проявлялось в повышении летальности. В 1989 году прогнозирование угрозы популяциям рыб опиралось на тестирование острой токсичности в краткосрочных (примерно четырехдневных) лабораторных исследованиях с применением растворимых в воде фракций 1-кольцевых и 2-кольцевых ароматических углеводородов (8). После разлива икра рыб и мальки хронически подвергались воздействию частично измененной погодными влияниями нефти в дисперсных формах, ускоривших распад на 3-, 4- и 5-кольцевые углеводороды, которые чаще всего не входили в традиционные регламенты лабораторных анализов на токсичность (15). Лабораторные исследования показали, что многокольцевые полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), образовавшиеся в результате измененной погодными условиями нефти, даже в таких низких концентрациях как 1 ppb (1 частица на млрд.) являются токсичными для икры лососевых рыб в течение месяцев ее развития, а для икры сельди – в течение 16 дней (20, 21). Это объясняет рост летальности среди эмбрионов лососевых рыб в загрязненных нефтью донных участках ручьев в течение минимум 4 лет после разлива (16).

Восстановление популяции каланов, которое в западной части PWS после запрета промысловой охоты на этих животных в среднем составляло 10%, после 1989 года этот показатель упал до 4% (22). На особенно загрязненном нефтью северном острове Найт от прежней популяции (до разлива) каланов осталась лишь половина, и восстановления стада не произошло вплоть до 2000 года, в то время как на острове Монтегю, который совсем не пострадал от разлива нефти, число каланов удвоилось только за период с 1995 по 1998 г.г.

(23). Сравнение числа тушек мертвых животных в весенние периоды 1976-1985 г.г., а затем – в 1989-1998 г.г. позволило установить, что выживаемость каланов в загрязненных нефтью районах PWS в годы после разлива нефти значительно сократилась (24). Кроме того, установлено значительное сокращение жизненного цикла животных, появившихся на свет и в годы после катастрофы, что объясняется хроническим воздействием на них вредных субстанций. Постоянная подверженность вредным воздействиям нефти в 1996-98 годах была подтверждена высоким содержанием энзима детоксикации CYP1A в особях, обитавших на северном острове Найт в отличие от особей с острова Монтегю (18). В этот период обилие кормовой базы каланов (двустворчатые моллюски, мидии, крабы) на островах Найт и Монтегю было практически одинаковым, поэтому инфицированием токсинами объектов охоты калана можно объяснить снижение темпов восстановления популяции этих животных на острове Найт (23). Моллюски поглощают и лишь частично усваивают углеводороды, это приводит к повышению концентрации загрязнения в тканях, что было установлено при исследовании традиционного пищевого ресурса калана – двустворчатого моллюска *Protothaca staminea*, в тканях которого устойчиво присутствовали токсины, по крайней мере, до 1996 года (7). Донные отложения изолированных участков, включая загрязненные нефтью мидиевые банки и зону обитания мелководной zostеры (*Zostera marina*) (25), также оставались загрязненными в течение длительного времени, и экспериментальные модели показали, что для их полного восстановления потребуется не менее 30 лет (14). Таким образом, для нас совершенно очевидно, что каланы серьезно пострадали от хронического вредного воздействия остаточных углеводородов, сохранившихся в их кормовой базе, и прежде всего, - в двустворчатых моллюсках. В отличие от каланов, рыбацкие речные выдры подверглись существенно меньшему воздействию вредных углеводородов, даже в зоне сильно загрязненной береговой линии. Это еще раз свидетельствует о том, что добываемая в донных отложениях пища представляет для животных куда большую опасность (18).

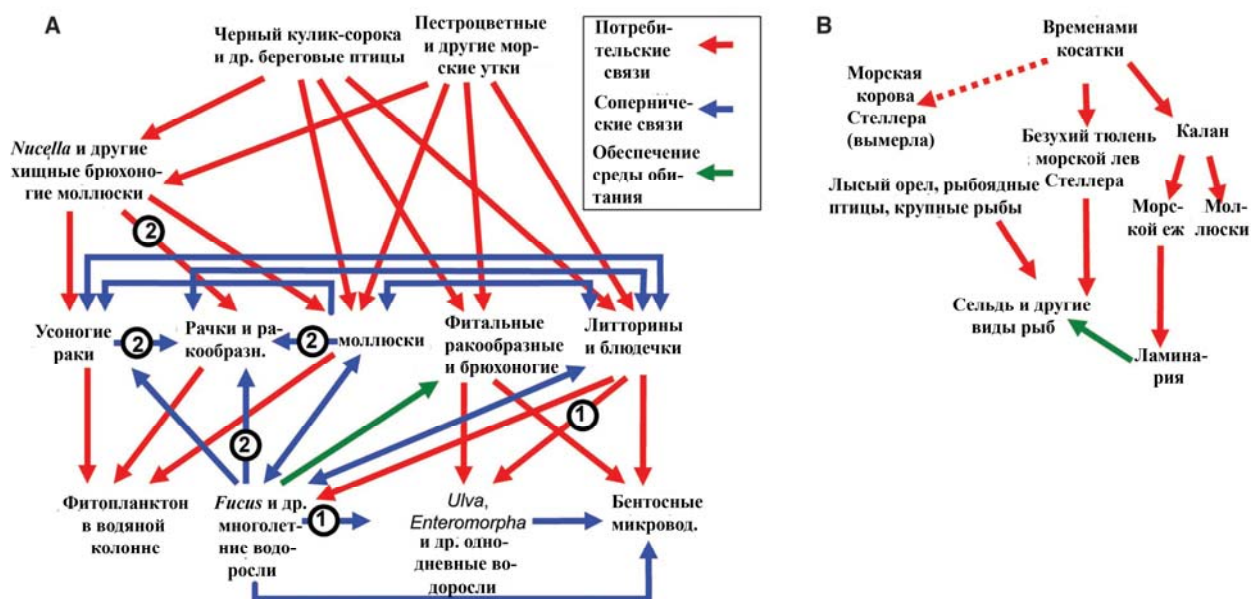
Среди морских птиц больше всего пострадали пестроцветные утки (harlequin ducks). Средствами радиослежения была установлена высокая летальность взрослых самок в период зимовки 1995-96 и 1996-98 на сильно загрязненных нефтью берегах острова Найт и острова Грин (летальность 22%) по сравнению с зимовавшими на о. Монтегю (летальность 16%); такова разница между группами птиц, совершавших перелеты по разным траекториям (26). Пестроцветные утки, которые питаются бентосными беспозвоночными литоральной полосы, показали в 1998 г. наличие энзима детоксикации CYP1A, который в отсутствие других индукторов,\* например, полихлорированных бифенилов (polychlorinated biphenyls - PCB), демонстрирует продолжающееся воздействие нефти спустя 9 лет после разлива (20). Масса тела пестроцветной утки в конце зимы негативно соотносилась с уровнями CYP1A в 1998 году, и этот факт наводит на мысль о том, что механизм дестабилизации энергетики привел к росту летальности в течение зимнего сезона (27). Отражая зависимость популяции пестроцветных уток от фактора выживания взрослых самок, численность этих птиц в PWS в 1995-1997 г.г. сократилась на 5% на загрязненных нефтью берегах в сравнении с устойчивой популяцией в районах, которые не подверглись загрязнению (26).

Исследования показали, что вредному воздействию углеводородов подверглись и другие виды морских птиц, традиционно добывавших корм донных отложениях мелководья. Гоголь Барроу (Barrow's goldeneye) – морская утка, зимующая в прибрежных водах Аляски, чью кормовую базу составляют мидиевые банки литоральной полосы – значительно сократил численность своей популяции в загрязненных зонах сразу же после разлива нефти и до 1991 г. не восстановил прежней численности (28). Было установлено,

---

\* индуктор (вещество, индуцирующее синтез определённого белка в клетке)

что обитавший вдоль загрязненных берегов острова Найт гоголь Барроу подвергался в течение 1996-1997 г.г. постоянному воздействию нефти, что подтверждается индукцией СУРІА (19). Прямая связь между кормовой базой литоральной зоны в виде бентосных беспозвоночных и хроническим воздействием остаточных токсинов нефти подтверждается продолжительностью жизненного цикла тихоокеанского чистика. Эта морская птица, которая добывает себе корм исключительно в прибрежной зоне, в период разлива нефти показала небывалую летальность (10). В 1999 году, т.е. спустя 10 лет после катастрофы с Exxon Valdez, птенцы чистика, питавшиеся только рыбой, демонстрировали невосприимчивость к токсинам, в то время как взрослые особи, добывавшие корм в виде бентосных беспозвоночных на мелководье, обнаружили в печени высокое содержание СУРІА (29).



Илл. 2. Система взаимоотношений живых организмов в северо-западной части Тихого океана, как было установлено, подверглась сильному косвенному воздействию. Острия стрелок указывают на группы, испытывающие на себе негативное влияние со стороны хищных видов, типы соперничества в биосфере, либо – позитивный фактор обеспечения среды обитания. В Категории «А» приведены представители фауны прибрежной литоральной зоны (5, 7). В результате массовой летальности в 1989 году: (i) фукуса, (ii) травоядных моллюсков «блюдечко» и береговых улиток литорин и (iii) популяции хищной нуцеллы, - в течение 0,5 – 1,5 лет после катастрофы отмечалось бурное распространение однодневных морских водорослей, что стало результатом замедленного влияния утраты всех цепочек взаимоотношений, помеченных значком «1». С задержкой на 2,5 года отмечался бурный рост популяций рачков и ракообразных (*chthamloid barnacles*) в сравнении с прежними плотностями этих популяций, что стало результатом опосредованного влияния утраты цепочек взаимоотношений, помеченных значком «2» (4, 7). В Категории «В» приведены виды, для которых охотничьими угодьями являются заросли ламинарии полосы, расположенной ниже приливо-отливной зоны (36,41). Несмотря на гибель более 50% каланов, обитавших на берегах сильно загрязненного острова Найт, отмечается лишь очень сдержанная тенденция к инициации этой потенциально сильной трофодинамики. Появилось несколько сообществ крупных морских ежей, хотя и без явных признаков бурного распространения. Не отмечается и стравливание (*overgrazing*) ресурсов ламинарии даже в условиях отсутствия восстановления популяции каланов на дату исследований (22, 23).

Сублетальные дозы токсинов приводят к разрушению здоровья, задержке развития и нарушению репродуктивной функции. В ряде исследований отмечались каскады событий, опосредованно влияющих на выживаемость и репродуктивные возможности отдельных видов, подвергшихся сублетальным уровням воздействия. В условиях воздействия нефти в 1989 г. замедлялся рост мальков лососевых рыб (8) и это повлекло за собой негативную

выживаемость молоди в море, ставшей из-за недостаточных размеров тела добычей хищников на этом этапе своего развития (30). После хронического воздействия на мальков лосося в лабораторных условиях дозами  $<20$  ppb PAH, что привело к задержке их роста, молодь была маркирована и выпущена в море. Впоследствии было установлено, что в течение следующих 1.5 лет из этой группы выжила лишь половина особей по сравнению с контрольной группой (21). Кроме того, ряд контрольных лабораторных исследований показал существенное ослабление репродуктивного процесса по причине резкого сокращения процента выживаемости зародышей в икре вернувшихся в водоемы взрослых лососей, в 1993 году испытанных на себе воздействие стабилизированной путем выветривания нефти на стадии эмбрионов и молоди (31). Это, точно установленное путем лабораторных экспериментов сокращение выживаемости и нарушение репродукционного потенциала после получения сублетальных уровней воздействия, согласуется с растущим пониманием, каким образом воздействие ксенобиотиков на самой ранней и чувствительной стадии развития позвоночных особей приводит к росту летальности или позднее к нарушению воспроизводства популяции путем разрушения эндокринной системы и аномалии развития (32). После разлива нефти танкером Exxon Valdez такие аномалии развития постоянно наблюдались у популяций сельди и лососевых (14, 20).

Проведенные исследования популяции черного кулика-сороки подтвердили негативное влияние на уровне популяции сублетальных воздействий токсинов нефти на орнитосферу прибрежной полосы загрязненной зоны. Летом 1989 года у пар черных куликов-сорок, чья кормовая база находилась на сильно загрязненных нефтью участках прибрежной полосы, отмечалось падение воспроизводства, к тому же отложенные в гнезда яйца были более мелкими, чем у особей, которые обитали в нетронутой нефтью зоне (33). Возросла и смертность среди птенцов в сезоны 1989 и 1990 г.г. пропорционально степени загрязненности зоны обитания. В процессе последующих исследований (34) было установлено, что черные кулики-сороки, действительно, питались загрязненными нефтью моллюсками, родители собирали в 1991 и 1992 г.г. на загрязненных участках корм для своих птенцов, что потом сказалось на задержке роста и развития молодых птиц по сравнению с контрольными особями в незагрязненных зонах. Падение уровня воспроизводства этого вида пернатых отмечалось и три года спустя после катастрофы с танкером Exxon Valdez в заливе Принс-Уильям. Процесс оперения птенцов происходил гораздо медленнее, задерживался рост массы тела, и в итоге эти факторы негативно сказывались на выживаемости птенцов кулика-сороки.

*Каскады косвенного воздействия.* В структурированных сообществах косвенное воздействие токсинов в загрязненных зонах в контексте трофодинамики может быть таким же существенным, как и прямое влияние негативных факторов (35). Результаты каскадных косвенных воздействий проявляются впоследствии, поскольку сам механизм такого воздействия является опосредованным. По всей вероятности, здесь имело место проявление двух самых мощных средств такого опосредованного воздействия общего характера: (i) трофические каскады, в которых хищные виды сократили потребление своей традиционной кормовой базы, что, в свою очередь, привело к неконтрольному росту последней (36); и (ii) рост биогенного ареала организмов, которые служат важным компонентом структуры окружающей среды или сами создают такую структуру (37). Используемые для анализа степени ущерба морской фауне и флоре современные модели оценки рисков игнорируют факторы косвенного воздействия, полагая популяции видов независимыми друг от друга (7, 8), даже – обитающие в скалистых береговых структурах, где экологические особенности среды обитания демонстрируют прямо противоположные взаимосвязи (38).

Косвенные взаимосвязи (Илл. 2А) задержали процессы воспроизводства на десять лет, а, возможно, и дольше (7). Драматичная утрата укрытия, которое обеспечивала биогенной среде ее самый главный гарант безопасности – наскальная водоросль *Fucus gardneri*, – стимулировала целый каскад косвенных негативных воздействий. Оголение скал и потеря главной кормовой базы для моллюсков (литорины и блюдечки) и для хищников (брюхоногие моллюски) сочеталось с распространением однодневных зеленых морских водорослей в 1989 и 1990 г.г. и легко приспособляющихся к изменениям условий обитания усонюгих рачков *Chthamalus dalli* в 1991 г. Отсутствие структурного покрова из водорослей привело к сокращению популяции беспозвоночных и самого фукуса (*Fucus*), чьи только что созревшие особи традиционно избегали высыхания, прячась под густыми кронами взрослых водорослей. Размножившиеся рачки *Chthamalus dalli* подрывали корневую систему фукуса, в результате чего растение отрывалось от скал во время сильного волнения. После частичного восстановления популяции фукуса на сильно загрязненных участках прибрежной зоны в 1994 году снова отмечалась массовая гибель этих растений. Такую циклическую нестабильность этого вида можно объяснить и фактором одновременного старения растений (5, 39). Косвенные взаимосвязи в скальных прибрежных сообществах являются хорошо организованными (38) и сложившаяся общая последовательность форм активности организмов на скальных литоральных берегах в течение десяти лет после разлива нефти танкером Exxon Valdez абсолютно адекватна динамике, которая наблюдалась после инцидента с разливом нефти в Торрей Каньон в Соединенном Королевстве (40). Ожидания быстрого восстановления большинства литоральных морских водорослей являются наивными, и им на смену должна придти генерализованная концепция с пониманием, как межвидовые взаимодействия приводят к последовательной цепи замедленных косвенных воздействий негативного характера в течение десяти и более лет (7).

Косвенные взаимодействия ни в коем случае не ограничиваются трофическими каскадами или литоральным бентосом. В широком аспекте этого явления каскады взаимодействия включают утрату ключевых компонентов в социально организованных популяциях, что впоследствии начинает проявляться в форме резкого увеличения летальности и снижении репродуктивного потенциала. После исключительно высокого уровня летальности (20%) в период с сентября 1988 и до весны 1989, в группе АВ, а в 1990 г. повышения летальности еще на 20% в этой группе резидентного вида (питающегося рыбой) – косаток, которые, как было установлено, посещали загрязненные нефтью воды, гибель взрослых самок в этом организованном в форме матриархата сообществе животных впоследствии привела к резкому сокращению их популяции (2). В другой группе (АТ1) мигрирующего вида (питающегося млекопитающими животными) косаток, потерявшей во время разлива нефти 40% своей численности, это привело почти к исчезновению названной группы (2). Более того, самым неоспоримым примером, как во всей морской экологии трофические каскады могут модифицировать морскую экосистему, является судьба ламинарии в водах Аляскинского залива (36). Иногда подвергаясь нападению косаток, утративших свою обширную традиционную кормовую базу млекопитающих (41), каланы контролировали численность популяций морских ежей, предотвращали их избыточное количество в зарослях ламинарии и других водорослей и тем самым сохраняли баланс рыб и беспозвоночных в экосистеме (Илл. 2В). Когда в результате разлива нефти популяция каланов в PWS сократилась на 50%, возникла тенденция к изменению динамики процесса регенерации, но в конечном итоге все ограничилось лишь сокращением кормовой базы каланов и увеличением физических размеров морских ежей (18). Тем не менее, даже если произойдет исчезновение каланов из этого района в результате нового разлива нефти, уровень воспроизводимости в каскаде калан-еж-ламинария настолько устойчив, чтобы эти факторы учитывались при формировании моделей оценки рисков. И наоборот: недопонимание важности поведенчески обоснованных косвенных влияний на динамику



развития и воспроизводства (42) в этих сообществах до сих пор приводит к недооценке этих факторов и полному их игнорированию при разработке моделей оценки рисков.

### ***Применение меняющихся парадигм экотоксичности нефти***

Общеизвестно, что проводимые в лабораториях тесты на кратковременное токсическое воздействие не являются эффективными для анализа экотоксикологического риска (43). Совершенно очевидно также, что для полного понимания степени негативного воздействия нефти и других токсинов на морскую экологию (6) необходимо проводить тесты на формы хронического воздействия, которым подвергаются живые организмы не в краткосрочный период, а в течение достаточно длительного времени.

Благодаря быстрому развитию приборов, с помощью которых стало возможным проводить исследования на молекулярном уровне, ученые все чаще стали осознавать потребность в проведении токсикологических анализов на физиологическом, биохимическом и гистопатологическом уровнях. Экологи давно знают о потенциальной важности косвенных воздействий каскадов взаимосвязей.

Обобщая сегодня результаты исследований, проведенных в течение всех 14 лет с момента разлива нефти танкером Exxon Valdez, собрано достаточно данных, чтобы сделать выводы о замедленных, хронических и косвенных факторах негативного воздействия нефтяного загрязнения на морскую среду обитания (Таблица 1).

Выходя за пределы фундаментальных основ экотоксикологии и помимо оперирования оценками кратковременного токсического воздействия, включение факторов замедленного, хронического и косвенного воздействия, которые проявляются в течение более длительных периодов времени станет равноценным разработке управления на основе экосистем лесными (44) и рыбными (45) ресурсами, чтобы охватить все звенья взаимосвязей, действующих внутри общей экосистемы. Такой синтез сможет охватить необходимые модификации экологических стандартов качества воды, управлять ливневой водой, эффективно справляться с разливами нефти в небольших объемах и станет, несомненно, полезным для других видов производственной и научной деятельности.

Смутные беспокойства по поводу плохого качества воды на традиционных нерестилищах в устьях рек, неизменно скудеющих рыбными ресурсами на протяжении многих лет, пора заменить осознанием истинных причин этого явления и сосредоточить внимание на загрязнителях специфического типа – многокольцевых ПАУ на физически изолированных донных нерестилищах и участках развития молоди.

В контексте замедленного воздействия последствий разлива нефти танкером Exxon Valdez (Таблица 1) и танкером Сан-Кристобаль на Галапагосских островах в 2001 г. (46) новых подходов требует процесс формирования модели оценки рисков в априорном решении о принятии мер по восстановлению экологии, как и в технологии оценки причиненного ущерба живой природе.

В настоящее время мы видим немало инициатив, направленных на улучшение прогнозирования устойчивости окружающей среды, чтобы обеспечить более надежное моделирование хронического, косвенного и замедленного воздействия угнетающих факторов в рамках существующей экосистемы.

**Таблица 1. Изменяющиеся парадигмы в экотоксикологии нефти, идущие от кратковременного токсического эффекта к синтезу на основе экосистемы прямого краткосрочного плюс долгосрочного хронического, замедленного и косвенного видов негативного воздействия.**

*Старая парадигма*

*Новая форма оценки*

**Физическая береговая среда обитания**

Выброшенная на побережье нефть (если берег не представляет собой болотистую местность) быстро рассеивается и разлагается под влиянием микробов и фотоллиза.

Процесс разложения нефти варьируется в зависимости от среды, наличия подповерхностных донных отложений, физически изолированных от внешних влияний, оксигенации и фотоллиза, в которых загрязнение нефтью, лишь частично измененной под влиянием погоды, сохраняется на годы.

**Токсичность нефти для рыб**

Исключительно краткосрочное действие (~4 дня) водорастворимых фракций (1-2-кольцевых ароматических углеводородов) с летальностью при концентрации 1 ppm.

Долгосрочное воздействие измененной погодой нефти (3-5-кольцевые субстанции) на эмбрионы рыб в концентрации на уровне ppm с косвенным воздействием на популяцию, проявляемом в задержке роста, нарушении репродуктивного потенциала и сокращении жизненного цикла.

**Токсичность нефти для морских птиц и млекопитающих**

Исключительно кратковременное действие на оперение птиц и мех животных с последующей летальностью от гипотермии, удушья, утопления или поглощения токсинов в процессе чистки перьев (меха).

Существенное влияние нефти (независимо от средств изоляции) в течение долгого времени посредством взаимосвязей с окружающей средой и загрязненными организмами; угроза здоровью и жизни особей при поглощении загрязненной нефтью пищи; нарушение жизненно важных функций (уход за потомством, размножение) в социально организованных популяциях.

**Негативное влияние нефти на прибрежную биосферу**

Высокая летальность посредством краткосрочного токсического воздействия на берегу и морском ложе исключительно для растений и беспозвоночных, чья гибель происходит по причине удушья.

Попытки очистки берега могут оказаться более губительными, чем сама нефть, в ходе очистительных работ (включая химический и физический методы очистки); из-за интенсивных биологических взаимосвязей в каменистой полосе прибоя и в зарослях ламинарии каскады замедленных косвенных воздействий (особенно, трофические каскады и утрата биогенной среды) увеличивают объем угроз и помимо прямого ущерба впоследствии надолго задерживают восстановление популяций.

## Примечания и список литературы

1. *Примечание:* При подготовке данного обзора мы использовали всю имеющуюся научную литературу. Возможность онлайн-доступа к информационным материалам (SOM) даст возможность воспользоваться дополнительными научными источниками.

## Список литературы

2. T.R. Loughlin, Ed., *Marine mammals and the "Exxon Valdez"* Academic Press, San Diego, 1994)
3. P. G. Wells, J.N. Butler, J.S. Hughes, Eds., *"Exxon Valdez" Oil Spill: Fate and Effects in Alaskan Waters* [ASTM(American Society for Testing and Materials), Philadelphia, 1995]
4. S. D. Rice, R. B. Spies, D. A. Wolfe, B. A. Wright, Eds., *Proceedings of the "Exxon Valdez" Oil Spill Symposium* (American Fisheries Society, Bethesda, MD, 1996).
5. R. T. Paine et al., *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **27**, 197 (1996).
6. National Research Council, *Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects* (National Academy Press, Washington, DC, 2002).
7. C. H. Peterson, *Adv. Mar. Biol.* **39**, 1 (2001).
8. S. D. Rice et al., *Rev. Fish. Sci.* **9**, 165 (2001).
9. R. A. Garrott, L. L. Eberhardt, D. M. Burn, *Mar. Mammal Sci.* **9**, 343 (1993).
10. J. F. Piatt, R. G. Ford, *Am. Fish. Soc. Symp.* **18**, 712 (1996).
11. D. A. Wolfe et al., *Environ. Sci. Tech.* **28**, 561A (1994).
12. M. O. Hayes, J. Michel, *Mar. Poll. Bull.* **38**, 92 (1999).
13. J. W. Short et al., *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 19 (2004).
14. M. G. Carls et al., *Mar. Environ. Res.* **51**, 167 (2001).
15. M. L. Murphy et al., *Trans. Am. Fish. Soc.* **128**, 909 (1999).
16. B. G. Bue, S. Sharr, J. E. Seeb, *Trans. Am. Fish. Soc.* **127**, 35 (1998).
17. S. C. Jewett, T. A. Dean, B. R. Woodin, M. K. Hochberg, J. J. Stegeman, *Mar. Environ. Res.* **54**, 21 (2002).
18. J. L. Bodkin et al., *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **241**, 237 (2002).
19. K. A. Trust, D. Esler, B. R. Woodin, J. J. Stegeman, *Mar. Poll. Bull.* **40**, 397 (2000).
20. G. D. Marty et al., *Can. J. Zool.* **75**, 989 (1997).
21. R. A. Heintz et al., *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **208**, 205 (2001).
22. J. L. Bodkin, B. E. Ballachey, M. A. Cronin, K. T. Scribner, *Conserv. Biol.* **13**, 1378 (1999).
23. T. A. Dean, J. L. Bodkin, S. C. Jewett, D. H. Monson, D. Jung, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **199**, 281 (2000).
24. D. H. Monson, D. F. Doak, B. E. Ballachey, A. M. Johnson, J. L. Bodkin, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **97**, 6562 (2000).
25. S. C. Jewett, T. A. Dean, R. O. Smith, A. Blanchard, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **185**, 59 (1999).
26. D. Esler, J. A. Schmutz, R. L. Jarvis, D. M. Mulcahy, *J. Wildl. Manag.* **64**, 839 (2000).
27. D. Esler et al., *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **241**, 271 (2002).
28. R. H. Day et al., *Ecol. Appl.* **7**, 593 (1997).
29. G. H. Golet et al., *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **241**, 287 (2002).
30. M. Willette, R. T. Cooney, K. Heyer, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **56**, 364 (2000).
31. R. A. Heintz, J. W. Short, S. D. Rice, *Environ. Toxicol. Chem.* **18**, 494 (1999).
32. M. R. Arkoosh, T. K. Collier, *Human Ecol. Risk Assess.* **8**, 265 (2002).
33. B. E. Sharp, M. Cody, R. Turner, *Am. Fish. Soc. Symp.* **18**, 748 (1996).
34. B. A. Andres, *J. Wildl. Manag.* **61**, 1322 (1997).
35. T. H. Schoener, in *Mutualism and Community Organization: Behavioural, Theoretical, and Food-Web Approaches*, H. Kawanabe, J. E. Cohen, K. Iwasaki, Eds., (Oxford Univ. Press, New York, 1993), pp. 365–411.
36. J. E. Estes, D. O. Duggins, *Ecol. Monogr.* **65**, 75 (1995).
37. C. G. Jones, J. H. Lawton, M. Shachak, *Oikos* **69**, 373 (1994).
38. B. A. Menge, *Ecol. Monogr.* **65**, 21 (1995).
39. D. C. Driskell, J. L. Ruesink, D. C. Lees, J. P. Houghton, W. B. Lindstrom, *Ecol. Appl.* **11**, 815 (2001).
40. S. J. Hawkins, A. J. Southward, in *Restoring the Nation's Marine Environment*, G. W. Thayer, Ed. (Maryland Sea Grant Publication, College Park, 1992), pp. 584–631.
41. J. E. Estes, M. T. Tinker, T. M. Williams, D. F. Doak, *Science* **282**, 473 (1998).
42. L. M. Dill, M. R. Heithaus, C. J. Walters, *Ecology* **84**, 1151 (2003).
43. K. D. Kimball, S. A. Levin, *Bioscience* **35**, 135 (1985).
44. N. L. Christensen et al., *Ecol. Appl.* **6**, 664 (1996).
45. L. W. Botsford, J. C. Castilla, C. H. Peterson, *Science* **277**, 509 (1997).
46. M. Wikelski, V. Wong, B. Chevalier, N. Rattenborg, H. L. Snell, *Nature* **417**, 607 (2002).
47. This paper was built upon the work of countless numbers of scientists who contributed to evaluating impacts of the Exxon Valdez oil spill. C. B. Hales, M. Lindeberg, and M. Powers produced the figures. Comments from D. Crawford-Brown, A. Gunther, and R. Noble are acknowledged.

### Supporting Online Material

[www.sciencemag.org/cgi/content/full/302/5653/2082/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/302/5653/2082/DC1)  
SOM Text  
References and Notes