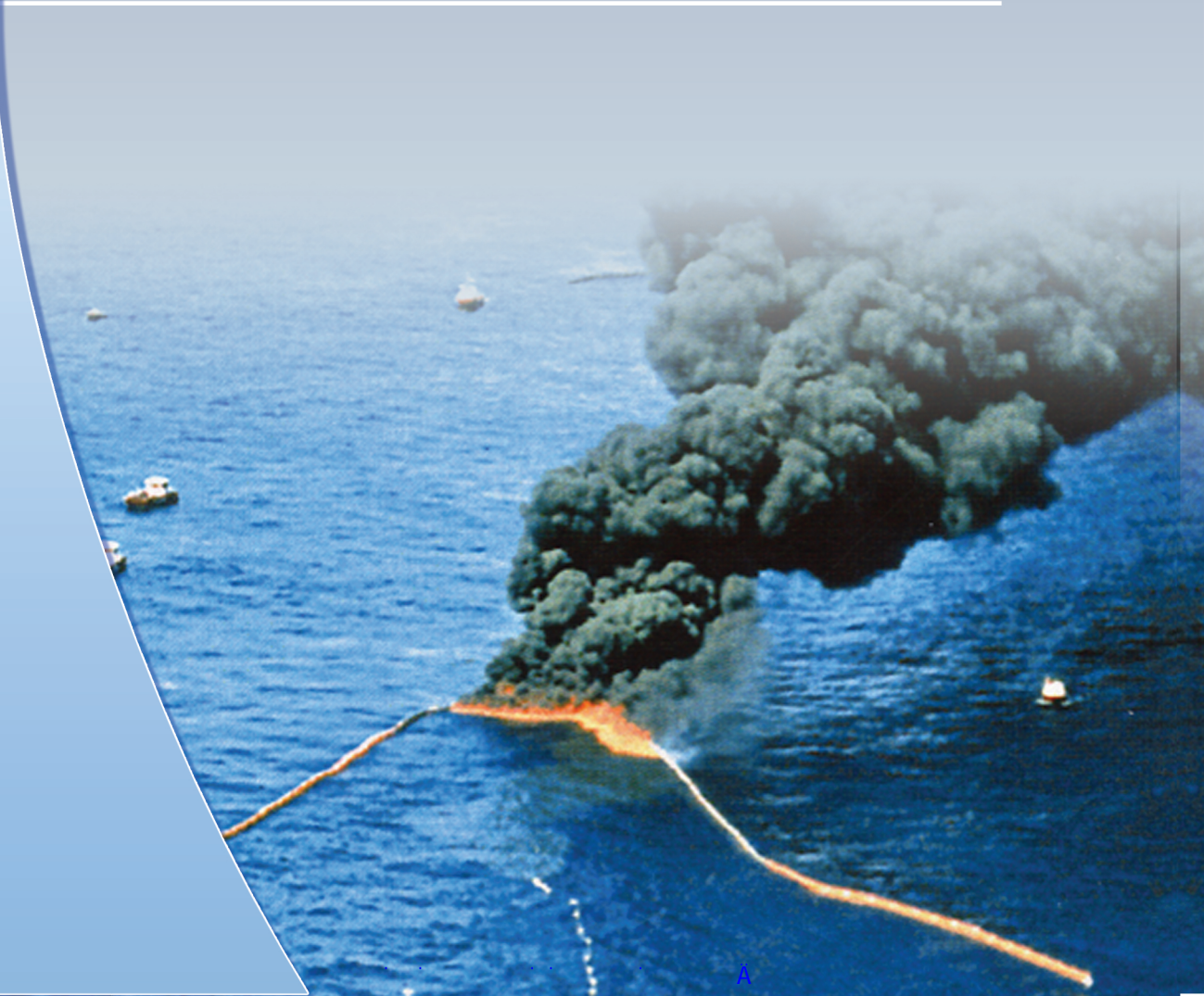




МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В ЗАПАДНОМ СЕКТОРЕ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова»

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В ЗАПАДНОМ СЕКТОРЕ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Учебное пособие

Под редакцией доктора
геолого-минералогических наук,
профессора М.Г. Губайдуллина

Архангельск
САФУ
2016

УДК 502.51(26):504.5:665.6(075)
ББК 26.22 я73
М 744

*Рекомендовано к изданию учебно-методическим советом
Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова*

Авторы: М.Г. Губайдуллин, Н. Ёстбёл, А.Б. Золотухин, В.Б. Коробов,
И.В. Мискевич, Ж.Р. Муангу, И.А. Немировская, П. Ренниген, М. Рид,
К. Сёрхейм, И. Синсгаас, А.В. Сунгуров, В.П. Шевченко

Рецензенты: **М.Н. Мансуров**, зав. отделением геологии, разработки
и эксплуатации морских месторождений нефти и газа
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», профессор, доктор технических наук;
С.В. Марков, директор Института комплексной безопасности
САФУ имени М.В. Ломоносова, кандидат технических наук

М 74 Моделирование разливов нефти в западном секторе Российской Арктики: учебное пособие / под ред. д-ра геол.-минер. наук, проф. М.Г. Губайдуллина; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. – Архангельск: САФУ, 2016. – 219 с.

ISBN 978-5-261-01150-7

Приведены краткие сведения о природных условиях западной части Российской Арктики, ресурсах углеводородов Баренцево-Карского шельфа. Рассмотрены загрязнения, связанные с нефтяными разливами, их распространение на морской поверхности и прибрежной зоне суши. Уделено большое внимание моделированию характера распространения нефти в морской среде с применением программного комплекса OSCAR. Показаны методы оценки экологического риска возможных разливов, технологии ликвидации аварийных разливов, а также проанализированы особенности экологического мониторинга при освоении месторождений в арктических условиях.

Для студентов направления «Нефтегазовое дело», «Прикладная геология», магистрантов и аспирантов. Может быть полезным для специалистов, занимающихся исследованием месторождений углеводородов Арктического шельфа и широкого круга читателей, интересующихся защитой окружающей среды при их освоении.

УДК 502.51(26):504.5:665.6(075)
ББК 26.22 я73

ISBN 978-5-261-01150-7

© Северный (Арктический) федеральный
университет им. М.В. Ломоносова, 2016

Дорогие друзья!

Вы держите в своих руках книгу, которая подготовлена авторским коллективом российских и норвежских ученых и специалистов в рамках Соглашения о сотрудничестве между Северным (Арктическим) федеральным университетом имени М.В. Ломоносова и нефтяной компанией «Статойл».

История взаимоотношений компании «Статойл» и Университета началась ещё в 2006 году в рамках Меморандума о сотрудничестве в сфере подготовки высококвалифицированных специалистов для нефтегазовой отрасли. «Статойл» – одна из первых зарубежных компаний, подписавших Договор о сотрудничестве с только что образованным федеральным университетом в 2010 году в рамках Дней Норвегии в Архангельске. За годы партнерства при поддержке Компании и с участием ведущих норвежских экспертов разработаны и реализованы образовательные программы по подготовке управленцев в нефтегазовом производстве и специалистов по разработке шельфовых месторождений. Двусторонние проекты включают стажировки и производственные практики студентов, повышение квалификации и переподготовку преподавателей, академическую мобильность в Университет Ставангера. Реализация совместного международного научно-образовательного проекта еще раз показала, как можно и нужно концентрировать общие усилия на решение сложнейших актуальных задач по освоению месторождений нефти и газа Арктического шельфа.

Моря Арктического шельфа России хранят в себе огромные запасы углеводородов, которые должны обеспечить экономическое развитие страны в XXI веке. Ввиду увеличивающегося интереса нефтяных компаний к Арктическому шельфу, анализ возможных сценариев развития ситуации при аварийных разливах нефти в морской среде с использованием современных программных комплексов для принятия эффективных превентивных мер является одной из важных задач для нефтегазовой отрасли. В связи с этим вопросы, рассмотренные в учебном пособии, представляются весьма актуальными и необходимыми при подготовке молодых специалистов для работы в условиях Арктической зоны.



Символично, что издание выходит в свет накануне 2017 года, объявленного Президентом РФ Владимиром Владимировичем Путиным Годом экологии в России и призванного привлечь внимание общества к вопросам экологического развития страны, сохранения биологического разнообразия и обеспечения экологической безопасности.

Выражаю уверенность, что книга будет полезной для студентов, магистрантов, аспирантов, а также для специалистов, занимающихся исследованием месторождений углеводородов Арктического шельфа, и широкого круга читателей, интересующихся защитой окружающей среды при ее освоении.

*Кудряшова Елена Владимировна,
ректор Северного (Арктического) федерального
университета имени М.В. Ломоносова,
профессор*

Дорогие читатели!

Компания «Статойл» имеет более чем 40-летний опыт осуществления морских нефтегазовых проектов в суровых природных условиях. Наша цель – обеспечивать мировые потребности в энергии без ущерба для окружающей среды.

В России, как и в других странах, мы ведем свою деятельность, уделяя большое внимание вопросам защиты окружающей среды и сознавая свою ответственность перед обществом. Поэтому вопросы экологии и образования всегда были в центре внимания нашей компании.

Реализуя различные социальные инвестиционные проекты в области образования на северо-западе России, «Статойл» также вносит свой вклад в его развитие. Одним из важнейших партнеров «Статойл» в образовательных проектах с 2010 года является Северный (Арктический) федеральный университет в Архангельске. САФУ совместно со «Статойл» и с привлечением ведущих норвежских научно-исследовательских и проектных институтов успешно реализуют исследовательские и образовательные программы.

Представляю вашему вниманию учебник, созданный совместными усилиями норвежских и российских ученых и специалистов при финансовой поддержке компании «Статойл». Надеюсь, что он будет полезен не только студентам, магистрантам и аспирантам САФУ, но и востребован в других вузах России, а также за рубежом специалистами, занимающимися исследованием месторождений углеводородов Арктического шельфа.



*Торгейр Кюдланд,
президент компании «Статойл», Россия
www.statoil.com*



ВВЕДЕНИЕ

Доля Арктического шельфа, занимаемая Россией, является самой большой среди арктических стран. Однако недостаток информации и имеющихся геологических данных порождает неопределенность относительно будущей роли Российской Арктики как одного из основных регионов поставок энергоресурсов во второй половине этого столетия. Другим источником неопределенности является способ доставки энергоресурсов из арктических морей, обусловленный национальной политикой, развитием инфраструктуры и инвестициями, осуществляемыми государством и нефтяными компаниями.

Моря Арктического шельфа России хранят в себе огромные запасы углеводородов, которые должны обеспечить экономическое развитие страны в XXI веке. По последним оценкам, на Арктическом шельфе сосредоточено до 80 % потенциальных углеводородных запасов России. Начальные суммарные ресурсы углеводородов* (НСР) Арктической зоны морской периферии России, по оценкам Э.М. Галимова и др., составляют около 100 млрд т нефтяного эквивалента (т н. э.), или, согласно некоторым авторам, тонн условного топлива (т у. т.) в пересчете на нефть (из них 13,5 млрд т нефти и более 73 трлн м³ газа). НСР состоят из объемов накопленной добычи, текущих запасов месторождений категорий А, В, С₁ и С₂, перспективных ресурсов категории Д₁ (С₃) и прогнозных ресурсов категорий Д₂ и Д₃. Разведанность НСР углеводородов российского шельфа не превышает 9...12 %.

Среди арктических морей важнейшее значение имеют Баренцево (вместе с Печорским морем) и Карское, которые содержат более 75 % ресурсов нефти и газа всего Арктического шельфа России. К концу 2014 г. в Баренцевом, Карском и Печорском морях, а также в районе Обской губы было открыто 19 месторождений нефти и газа.

Сложности, сопутствующие освоению этих ресурсов (суровый климат, ледовые условия, высокие затраты, неразвитая инфраструктура, низкая разведанность ресурсов, отсутствие технологий и необходимого оборудования, недостаточный опыт и нехватка квалифицированного персонала, вопросы охраны окружающей среды и промышленной безопасности, логистика и пр.) в комбинации с геополитическими вопросами представляют текущие и потенциальные проблемы освоения нефтегазовых ресурсов, расположенных в Арктике.

* НСР – это начальный (т. е. до начала промышленной эксплуатации) объем ресурсов нефти, газа, конденсата в недрах осадочных комплексов, промышленная нефтегазоносность которых доказана результатами геологоразведочных работ.

Активное вовлечение ресурсов Российской Арктики в процессы глобальных поставок энергоресурсов невозможно без ясного понимания потенциальных возможностей рынка для российских нефти и газа (потребные объемы, временной интервал, способ и пути транспортировки) и требует пристального внимания правительства к решению наиболее важных вопросов. Однако огромные возможности добычи, транспорта и использования арктических нефтегазовых ресурсов являются движущими силами, стимулирующими развитие национальной и интернациональной нефтяной промышленности и их активное сотрудничество. Будущая роль Арктического региона должна быть тщательно проанализирована, и ресурсы региона – разведаны и оценены.

В настоящее время вывоз добываемых нефти и газа как на континентальных, так и морских месторождениях осуществляется морским путём преимущественно в западном направлении. Причём через акватории Белого и Баренцева морей перевозится не только арктическая нефть, но и поставляемая из других регионов, откуда она доставляется железнодорожным транспортом в морские порты и перегружается на танкера. Объём перевозимых нефти и нефтепродуктов ежегодно нарастает, и западный сектор Арктики превратился в настоящий транспортный коридор с соответствующей инфраструктурой: трубопроводами, хранилищами, терминалами и танкерным флотом.

Из мировой практики хорошо известно, что чем больше объём транспортируемой нефти и нефтепродуктов, тем большая их утечка в окружающую среду и выше вероятность аварийных разливов.

Освоение арктических месторождений углеводородного сырья и его транспортировка осуществляется в сложных природных условиях. Для этих широт характерны явления, существенным образом усложняющие обустройство месторождений и проведение транспортных операций, особенно в море. Полярная ночь ухудшает видимость, но и яркое солнце не лучшим образом сказывается на зрении, низкие температуры воздуха приводят к обледенению судов и сооружений, часто наблюдаются штормы, ураганы и другие стихийные явления. Большую часть года водная поверхность покрыта льдом, что требует присутствия ледокольного флота и разработки специальных конструкций гидротехнических сооружений, способных выдерживать колоссальные нагрузки ледяных полей и ледяных образований. Сложностью отличается и навигационная обстановка. Большая изрезанность береговой черты, наличие множества островов, сильные течения, мелководные участки, а зимой и лёд, создают серьёзные проблемы для плавания всех типов судов и транспортировки буровых платформ. Как следствие таких природных и навигационных условий, более тяжёлые последствия нефтяного загрязнения для природной среды. Также более сложные условия для ликвидации последствий аварий, поскольку для разворачивания и проведения операций по сбору разлитой нефти и нефтепродуктов требуется больше времени и средств.

Неразвитость транспортной инфраструктуры региона является весьма значимым фактором, усложняющим разработку нефтяных месторождений, транспортировку нефтяных углеводородов, борьбу с нефтяными разливами. Места базирования спасательных средств – порты Архангельск и Мурманск – находятся в двух сутках перехода от юго-восточной части Баренцева моря,

наиболее потенциально аварийно-опасного района. В порту Нарьян-Мар по ряду причин пока не целесообразно содержать крупные спасательные суда и средства ликвидации аварийных разливов.

То же можно сказать и об аэропортах. Время подлёта от аэропортов, конечно, существенно меньше по сравнению с переходом судов в заданный район, но здесь есть свои проблемы. Во-первых, из-за погодных условий аэропорты могут быть закрыты сутками, а во-вторых, не всегда применение авиации для борьбы с нефтяным загрязнением может быть оправдано.

Чтобы эффективно планировать и проводить операции по ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, необходимо знать поведение нефтяного пятна на водной поверхности и эволюцию разлитой нефти под действием различных факторов. Отсюда вытекает необходимость математического моделирования разливов и оценки экологических рисков.

Математические модели, пусть в рамках определённых допущений на характер протекания процессов в природе и физико-химических превращений в нефти и нефтепродуктах под действием этих самых процессов, позволяют довольно точно имитировать распространение нефтяного загрязнения и определять зоны поражения водной акватории и морского побережья, а также оценивать ущерб, нанесенный биологическим и рекреационным ресурсам. В настоящее время во многих странах разработано множество таких моделей. В сущности математическая модель – это целый комплекс, состоящий из отдельных блоков, последовательно рассчитывающих необходимые для ввода в следующий блок характеристики.

Среди многочисленных моделей нефтяных разливов на водной поверхности выделяется модель OSCAR (The Oil Spill Contingency and Response Model), разработанная группой норвежских учёных. В чём же преимущество этой модели по сравнению с другими?

Во-первых, она позволяет рассчитывать эволюцию нефтяного пятна – траекторию, форму пятна, концентрации нефти и нефтепродуктов, толщину плёнки, испарение в атмосферу, внутриводное загрязнение. Во-вторых, она даёт возможность оценивать потребность в необходимых средствах ликвидации аварийных разливов для различных сценариев аварий. В-третьих, при помощи этой модели можно оценить и риски загрязнения различных акваторий, устьевых областей впадающих в море рек и участков побережья. В-четвертых, входящие в модель блоки гидрометеорологической информации имеют самостоятельное значение и дают возможность получать климатические характеристики приводного слоя атмосферы и режима морских вод, необходимых для расчёта нагрузок на гидротехнические сооружения и суда и проведения инженерных изысканий. Поэтому эта модель положена в основу данного учебного пособия, подготовленного российскими и норвежскими учёными специалистами. Следует отметить, что данная версия модели не позволяет детально анализировать поведение нефтяного пятна в условиях ледяного покрова. Реализация этой задачи пока находится на стадии разработки и, по-видимому, будет дополнительно рассмотрена в дальнейших изданиях. Здесь этот вопрос рассматривается на уровне постановки задачи и особенностей подхода к его решению.

Что нужно знать и уметь для пользования этим комплексом? Для того, чтобы правильно и эффективно использовать возможности модели OSCAR, необходимо не только уметь работать с интерфейсом (см. приложения А и Б), но и иметь правильное представление о процессах, влияющих на нефтяное загрязнение в Арктике. Поэтому данное пособие выстроено таким образом, чтобы получить все необходимые для этого знания.

Поскольку в модели OSCAR не предусмотрено моделирование загрязнения нефтью земной поверхности, авторским коллективом специально разработана модель для оценки распространения нефти на грунтах применительно к условиям тундры прибрежной зоны.

Сотрудничество в области анализа экологических рисков и ликвидации аварийных разливов нефти на случай непредвиденных обстоятельств осуществлялось в рамках соглашения между САФУ и норвежской нефтяной компанией «Статойл». В работе проектной группы, кроме специалистов Института нефти и газа САФУ и «Статойл», входили представители норвежских научно-исследовательских учреждений SINTEF и DNV.

Основные задачи международного проекта:

- разработка и внедрение методологии по оценке экологических рисков (ERA) при освоении месторождений нефти в Российской Арктике;
- адаптация и внедрение программы моделирования разлива нефти на поверхности моря OSCAR для решения научно-образовательных задач с разработкой модулей для анализа дрейфа нефти и мер реагирования на разливы нефти (OSRA) в условиях Арктического шельфа России;
- подготовка академического курса обучения на степень магистра по методологиям ERA и OSRA в САФУ.

В качестве примера района исследований выбрана западная часть Арктического шельфа России, которая в настоящее время является наиболее изученной территорией Российской Арктики. В результате решения указанных выше задач в течение 2010–2014 гг. международным авторским коллективом подготовлено предлагаемое учебное пособие. Краткие сведения об авторах приведены в конце книги. Перевод части текста с английского на русский язык выполнен Н.В. Багрецовой. Авторы выражают огромную благодарность руководству компании «Статойл», которая оказала финансовую помощь в реализации проекта.

Оглавление

<i>Кудряшова Е.В.</i> [Слово ректора].....	3
<i>Кюдланд Т.</i> [Обращение к читателям]	5
Введение (<i>Губайдуллин М.Г., Коробов В.Б.</i>)	7
Глава 1. Особенности природных условий западного сектора Арктической зоны России	11
1.1. Геологическое строение и рельеф (<i>Губайдуллин М.Г.</i>).....	11
1.1.1. Основные сведения о строении фундамента и осадочного чехла...	11
1.1.2. Структурно-тектоническое районирование Баренцево-Карского шельфа.....	18
1.1.3. Современные тектонические движения и морфоструктурная схема шельфа	21
1.1.4. Характеристика современного осадконакопления	25
1.2. Климат и климатообразующие факторы (<i>Коробов В.Б.</i>).....	27
1.3. Поверхностные воды (<i>Коробов В.Б.</i>)	29
1.3.1. Океаны и моря.....	29
1.3.2. Реки, озёра, болота.....	35
1.4. Растительный мир (<i>Мискевич И.В.</i>)	38
1.4.1. Флора водных экосистем	38
1.4.2. Флора экосистем суши.....	40
1.5. Животный мир (<i>Мискевич И.В.</i>)	42
1.5.1. Фауна водных экосистем	42
1.5.2. Фауна экосистем суши	48
Контрольные вопросы.....	49
Список литературы.....	49
Глава 2. Ресурсы углеводородов и перспективы их освоения (<i>Золотухин А.Б., Сунгуров А.В.</i>).....	52
2.1. Углеводородные ресурсы западной части Арктики.....	53
2.1.1. Баренцево море	54
2.1.2. Карское море.....	63
2.2. Совокупный углеводородный потенциал Баренцева и Карского морей, полуострова Ямал, Обской и Тазовской губ	66
2.3. Об объединении ресурсов и международном сотрудничестве	67
Контрольные вопросы.....	68
Список литературы.....	69
Глава 3. Загрязнение природной среды (<i>Коробов В.Б., Немировская И.А., Шевченко В.П., Муангу Ж. Р.</i>).....	70
3.1. Источники загрязнения	70
3.2. Общее состояние загрязнённости	71
3.2.1. Загрязненность атмосферного воздуха.....	72
3.2.2. Загрязненность поверхностных и подземных вод	73
3.2.3. Загрязненность земной поверхности.....	74
3.3. Загрязнения, связанные с разливами нефти	75

3.4. Поведение нефтяных углеводородов в окружающей среде Арктики	76
3.4.1. Загрязнение почв и грунтов в прибрежной зоне.....	76
3.4.2. Математическая модель растекания нефти от точечного источника	78
3.4.3. Влияние на человека.....	81
Контрольные вопросы.....	82
Список литературы.....	82
Глава 4. Распространение нефтяных разливов на морской поверхности (<i>Сёр-хейм К.</i>).....	83
4.1. Химический состав сырых нефтей.....	83
4.2. Физические свойства сырой нефти.....	85
4.3. Атмосферное воздействие на нефть в открытом море	88
4.4. Категории нефти при ее распространении на морской поверхности.....	97
4.5. Кодирование внешних признаков нефти.....	99
4.6. Характер распространения подводных утечек и выбросов нефти	100
4.7. Атмосферное воздействие на нефть в ледовых водах	104
Контрольные вопросы.....	106
Список литературы.....	106
Список рекомендуемой литературы.....	107
Глава 5. Моделирование характера распространения нефти в морской среде на основе информационной системы OSCAR (<i>Рид М., Рёнинген П.</i>)	108
5.1. Использование моделирования нефтяных разливов	110
5.1.1. Планирование действий в случае возможных аварий и анализ экологического риска	110
5.1.2. Моделирование оперативных прогнозов в режиме реального времени	111
5.2. Общая информация о программе имитационного моделирования мер предупреждения и ликвидации разливов нефти OSCAR.....	112
5.2.1. Моделирование глубоководного шлейфа выброса.....	116
5.2.2. Моделирование изменения химического состава нефти при атмосферном воздействии	118
5.2.3. Математические основы моделирования разливов нефти.....	119
5.3. Особенности моделирования нефтяного разлива	128
5.3.1. Береговая линия и батиметрические данные.....	129
5.3.2. Океанические течения и ледяной покров.....	131
5.3.3. Волны и ветер.....	131
Контрольные вопросы.....	132
Список литературы.....	132
Список рекомендуемой литературы.....	132
Глава 6. Оценка экологического риска возможного разлива нефти (<i>Ёстбёл Н.</i>)	134
6.1. Определение возможных сценариев и вероятностный анализ разлива нефти	136
6.2. Моделирование характера распространения разлива и его траектории	137
6.3. Природные объекты.....	138
6.4. Критерии приемлемости риска.....	140
6.5. Методика расчета экологического риска.....	140
6.5.1. Оценка ущерба популяции морских птиц и морских млекопитающих.....	141

6.5.2. Оценка риска для береговых мест обитания	144
6.5.3. Оценка ущерба популяции рыб.....	146
Контрольные вопросы.....	149
Список литературы.....	149
Перечень нормативных документов, применяемых в России.....	149
Глава 7. Ликвидация аварийных разливов нефти (Сингсаас И.).....	151
7.1. Механический сбор нефти.....	151
7.1.1. Механический сбор нефти в открытой воде.....	151
7.1.2. Механический сбор нефти в условиях Арктики.....	154
7.1.3. Новые технологические разработки.....	156
7.2. Химические диспергенты.....	159
7.2.1. Краткие сведения и принцип действия диспергентов	159
7.2.2. Использование диспергентов в открытой воде	161
7.2.3. Использование диспергентов в условиях Арктики.....	163
7.3. Сжигание на месте	164
7.3.1. Основные принципы сжигания нефти.....	164
7.3.2. Сжигание на месте в открытых водах и в условиях Арктики	165
7.4. Обработка береговой линии.....	168
7.4.1. Типы берегов	168
7.4.2. Методы обработки береговой линии.....	169
7.5. Планирование вариантов действий в случае разливов нефти	171
Контрольные вопросы.....	174
Список литературы.....	174
Список рекомендуемой литературы.....	175
Глава 8. Экологический мониторинг (Губайдуллин М.Г., Сингсаас И.).....	176
8.1. Назначение экологического мониторинга	176
8.2. Методы, технические средства и организация проведения экологического мониторинга морских акваторий	177
8.3. Особенности экомониторинга нефтяного пятна в условиях открытой воды	183
8.3.1. Спутники и авиация.....	183
8.3.2. Другие современные разработки	184
8.4. Экологический мониторинг разлива нефти при наличии ледяного покрова.....	186
8.4.1. Приборы дальнего видения воздушного базирования	186
8.4.2. Спутники и системы наземного базирования.....	187
8.4.3. Новые технологии	188
Контрольные вопросы.....	189
Список литературы.....	189
Заключение (Губайдуллин М.Г.)	190
Приложения.....	193
Приложение А. Настройки программы OSCAR и имитационное моделирование разлива нефти (Реннингем П.)	194
Приложение Б. Анализ экологического риска: разбор практического примера (Ёстбёл Н.)	203
Краткие сведения об авторах	214