

Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

(РОСГИДРОМЕТ)

Федеральное государственное бюджетное учреждение

«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени Н.Н.Зубова»

(ФГБУ «ГОИН»)

Инв. № \_\_\_\_\_



УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ ГОИН

И.В. Ивачёв

2021 г.

## ОТЧЕТ

о выполнении работ по моделированию разливов нефти при различных сценариях развития аварийных и чрезвычайных ситуаций для разработки Плана по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов (ПЛРН) и оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) Варандейского нефтяного отгрузочного терминала (ВНОТ) ООО «Варандейский терминал»



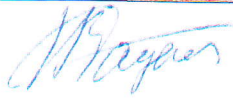





Отв. исполнитель проекта,

И.о. зав. лабораторией, к.ф.-м.н.

С.Н. Зацепя

Москва – 2021

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

ФГБУ «ГОИН»	Подпись	ФИО
Отв. исполнитель проекта, зав. лабораторией, к.ф.-м.н.		Зацева С.Н.
Ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.		Дианский Н.А.
Старший научный сотрудник		Ивченко А.А.
Старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.		Солбаков В.В.
Старший научный сотрудник, к.т.н		Журавель В.И.
Зав. лабораторией		Фомин В.В.

## РЕФЕРАТ

Отчет содержит 113 страниц, 93 рисунка, 12 таблиц.

В отчете содержатся результаты работы по моделированию разливов нефти при различных сценариях развития аварийных и чрезвычайных ситуаций для разработки Плана по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов (ПЛРН) и оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) Варандейского нефтяного отгрузочного терминала (ВНОТ) ООО «Варандейский терминал». В рамках проекта были реконструированы поля приводного ветра и гидрологических характеристик за 20 лет с 1995 по 2014 год. Для расчета гидрологических параметров была использована модель INMOM, в качестве модели нефтяного разлива – модель SPILLMOD, основанная на асимптотических решениях уравнения для растекания легкой жидкости по поверхности более тяжелой для траекторных расчетов. Результаты расчетов распространения нефти, охватывающие период 20 лет, использовались для получения статистических характеристик возможного распространения нефтяных разливов для сценариев технической аварии, определенных Техническим заданием. При проведении расчетов учитывались физико-химические свойства определенных проектом нефтепродуктов и особенности их эволюции в морской среде.

Рассмотрено четыре различных сценария технической аварии, возможных функционировании терминала, для них приведены результаты оценки зон риска распространения нефти и судового топлива МТУ-180 (IFO-180), приведены карты распределения вероятности достижения участков морской акватории и берегов. Приведены детальные сведения о результатах моделирования для отдельных сценариев распространения разливов, которым соответствуют реальные исторические гидрометеорологические условия. В приложениях приведено описание гидрометеорологических условий для рассматриваемого региона, описание используемых математических моделей и другая справочная информация.

## Содержание

<b>Список рисунков</b> .....	6
<b>Список таблиц</b> .....	9
1. Введение.....	10
2. Исходные данные для моделирования .....	12
2.1. Сценарии технических аварий на ВНОТ .....	12
2.2. Физические свойства нефти и судового топлива.....	13
2.3. Оценка возможности образования эмульсии «вода в нефти» .....	14
2.4. Сведения о продолжительности светового дня на объекте .....	16
2.5. Сведения об изменении приливного уровня моря на объекте.....	16
2.6. ООПТ, находящиеся в зоне риска возможного загрязнения нефтью .....	18
3. Методология моделирования .....	21
3.1. Сценарии гидрометеорологических условий.....	21
3.2. Сценарии распространения нефти .....	22
3.3. Требования к моделям распространения нефти.....	23
4. Риск – анализ распространения разливов нефти .....	25
5. Результаты моделирования.....	28
5.1. Оценка выветривания нефти и судового топлива по сценариям ТА 1-4.....	28
1.1.1 Оценка выветривания разливов в Сценарии ТА1-ТА3 .....	28
1.1.2 Оценка выветривания разливов в Сценарии ТА4.....	29
5.2. Оценка геометрических размеров разливов .....	30
5.2.1. Сценарий ТА1.....	31
5.2.2. Сценарий ТА2.....	31
5.2.3. Сценарий ТА3.....	31
5.2.4. Сценарий ТА4.....	32
5.3. Оценка вероятности достижения разливом нефти береговой зоны .....	34
5.3.1. Сценарий ТА 1.....	35
5.3.2. Сценарий ТА 2.....	36
5.3.3. Сценарий ТА 3.....	37
5.3.4. Сценарий ТА 4.....	38
5.4. Примеры расчета отдельных сценариев распространения разливов (PP) .....	38
5.4.1. Пример распространения разлива нефти из трубопровода (ТА1) по метеорологическому сценарию М4239_20.....	39
5.4.2. Пример распространения разлива нефти из трубопровода (ТА2) по метеорологическому сценарию М4736_20.....	40
5.4.3. Пример распространения разлива нефти из танкера (ТА3) по метеорологическому сценарию М6116_19 .....	41
5.4.4. Примеры разлива судового топлива (ТА4).....	42
5.4.4.1. Сценарий распространения разлива судового топлива по метеорологическому сценарию М6116_19 (12.09.2013, 20 часов) .....	42

5.4.4.2.	Сценарий распространения разлива судового топлива по метеорологическому сценарию M6537_19 (30.09.2013, 9 часов) .....	43
5.4.4.3.	Сценарий распространения разлива судового топлива по метеорологическому сценарию M6807_19 (11.10.2013, 15 часов) .....	44
5.4.4.4.	Разлив судового топлива в зимних условиях (10 февраля 1995 года).....	45
5.5.	Результаты риск-анализа распространения нефти.....	46
5.5.1.	Зоны риска распространения нефти, Вероятности воздействия на акваторию и побережье. Сценарий 1 .....	47
5.5.2.	Зоны риска распространения нефти. Вероятности воздействия на акваторию и побережье. Сценарий 2 .....	53
5.5.3.	Зоны риска распространения нефти, Вероятности воздействия на акваторию и побережье. Сценарий 3 .....	58
5.5.4.	Зоны риска распространения нефти. Вероятности воздействия на акваторию и побережье. Сценарий 4 .....	63
6.	Приложения .....	68
6.1.	Общее описание физико-химической трансформации разлива нефти в морской среде.....	68
6.2.	Некоторые сведения о разливах тяжелой нефти и нефти с высокой температурой текучести .....	70
6.3.	Описание модели SPILLMOD .....	73
6.3.1.	Постановка задачи для расчета распространения нефти по открытой воде .....	73
6.3.2.	О моделировании распространения разливов нефти в дрейфующем льду.....	76
6.3.2.1.	Процессы выветривания и изменение физических свойств нефти .....	78
6.3.2.2.	Особенности распространения нефти с высокой температурой текучести.....	79
6.4.	Характеристика гидрометеорологических условий Печорского моря .....	87
6.4.1.	Ледовые условия .....	87
6.4.1.1.	Номенклатура морских льдов .....	90
6.4.2.	Метеорологические условия .....	92
6.4.3.	Розы ветров.....	96
6.4.4.	Статистика высот ветровых волн .....	99
6.4.5.	Термохалинные характеристики Печорского моря .....	100
6.4.5.1.	Температура воды .....	100
6.4.5.2.	Соленость воды .....	103
6.4.5.3.	Плотность воды.....	104
6.5.	Тематический набор данных для моделирования.....	105
6.5.1.	Общая схема моделирования гидрометеорологических условий.....	105
6.5.2.	Адаптация модели атмосферной циркуляции WRF.....	106
6.5.3.	Адаптация модели морской циркуляции INMOM .....	107
7.	Список литературы.....	110

## Список рисунков

Рисунок 2.1 Положение точек возможных сбросов нефти на карте (а) и на схеме (б) .....	13
Рисунок 2.2. Продолжительность светового дня в районе МСЛОП в зависимости от времени от начала года (номера сценария) .....	16
Рисунок 2.3. Фотографии литоральной зоны Варандея (а, б) и острова Долгий (в, г) .....	17
Рисунок 2.4 Ход приливного уровня моря в пункте Варандей .....	17
Рисунок 2.5. Карта ООПТ, входящих в зону влияния разливов .....	18
Рисунок 2.6. Группировка ООПТ для оценки вероятности воздействия .....	20
Рисунок 5.1 Примеры изменение количества судового топлива на поверхности моря (а) и количества диспергированного нефтепродукта (б) при постоянных скоростях ветра .....	28
Рисунок 5.2. Статистика количества нефти на поверхности моря в Сценарии ТА4 в летний сезон (а) и весенний сезоны (б) .....	29
Рисунок 5.3. Статистика распределения скорости ветра по тематическому набору данных .....	30
Рисунок 5.4. Радиус рассеяния диффундирующей примеси по [ <i>Ocubo, 1971</i> ] .....	30
Рисунок 5.5. Изменение геометрических размеров области загрязнения при сценарии сброса ТА1 .....	31
Рисунок 5.6. Изменение геометрических размеров области загрязнения при сценарии сброса ТА2 .....	31
Рисунок 5.7. Изменение геометрических размеров области загрязнения при сценарии сброса ТА3 .....	32
Рисунок 5.8. Изменение площади разлива судового топлива при сценарии сброса ТА4 .....	32
Рисунок 5.9. Среднемноголетнее положение припайного льда в Печорском море. ....	35
Рисунок 5.10. Вероятность достижения разливом нефти и нефтепродуктов участков побережья при сценарии ТА 1 .....	36
Рисунок 5.11. Вероятность достижения разливом нефти и нефтепродуктов участков побережья при сценарии ТА 2 .....	37
Рисунок 5.12. Вероятность достижения разливом нефти и нефтепродуктов участков побережья при сценарии ТА 3 .....	37
Рисунок 5.13. Вероятность достижения разливом нефти и нефтепродуктов участков побережья при сценарии ТА 4 .....	38
Рисунок 5.14. Последовательные положения области нефтяного загрязнения в сценарии М4239_20 .....	39
Рисунок 5.15. Баланс массы в разливе нефти из трубопровода по сценарию М4239_20 (а) и изменение среднего количества нефти на м <sup>2</sup> поверхности (б) .....	39
Рисунок 5.16. Последовательные положения области нефтяного загрязнения в сценарии М4736_20 .....	40
Рисунок 5.15. Баланс массы в разливе нефти из трубопровода по сценарию М4736_20 (а) и изменение среднего количества нефти на м <sup>2</sup> поверхности (б) .....	40
Рисунок 5.17. Последовательные положения области нефтяного загрязнения в сценарии М6116_19 .....	41
Рисунок 5.18. Баланс массы в разливе нефти из танкера по сценарию М6166_19 (а) и изменение размеров пятна (б) .....	41
Рисунок 5.19. Последовательные положения пятна судового топлива в сценарии М6116_19 .....	42
Рисунок 5.20. Баланс массы в сценарии распространения судового топлива М6116_19 .....	42
Рисунок 5.21. Последовательные положения пятна судового топлива в сценарии М6537_19 .....	43
Рисунок 5.22. Баланс массы в сценарии распространения судового топлива М6537_19 .....	43
Рисунок 5.23. Изменение скорости ветра и размеров пятна судового топлива по Сценарию 6537 .....	44
Рисунок 5.24. Последовательные положения пятна судового топлива в сценарии М6537_19 .....	44
Рисунок 5.25. Баланс массы в сценарии распространения судового топлива М6537_19 .....	44
Рисунок 5.26. Изменение скорости ветра и размеров пятна судового топлива по Сценарию М6537_19 .....	45
Рисунок 5.27. Изменение скорости ветра и количества диспергированного топлива в Сценарии М960_1 (10.02.1995) .....	45
Рисунок 5.28. Изменение сплоченности льда и количества диспергированного топлива в Сценарии М960_1 (10.02.1995) .....	45
Рисунок 5.29. Вероятность воздействия на акваторию в зимний сезон (I-IV). Сценарий 1, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток .....	48
Рисунок 5.30. Вероятность воздействия на акваторию летом (V-VIII). Сценарий 1, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток .....	48
Рисунок 5.31. Вероятность воздействия на акваторию осенью (IX-XII). Сценарий 1, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток .....	49
Рисунок 5.32. Зоны риска распространения нефти в зимний сезон (I-IV). Сценарий 1. а – зоны риска распространения нефти (сутки), б – зоны риска распространения нефти (часы) .....	49



Рисунок 5.62. Вероятность воздействия на побережье в зимний сезон (I-IV). Сценарий 4, толщина пленки >10 мкм. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток.....	66
Рисунок 5.63. Вероятность воздействия на побережье летом (V-VIII). Сценарий 4, толщина пленки >10 мкм. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток.....	67
Рисунок 5.64. Вероятность воздействия на побережье осенью (IX-XII). Сценарий 4, толщина пленки >10 мкм. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток.....	67
Рисунок 6.1 Совокупность состояний нефтяного разлива в морской среде и основных процессов трансформации в различных средах.....	69
Рисунок 6.2. Нефть, разлитая в море при температуре ниже температуры застывания, образует полутвердые фрагменты. ....	71
Рисунок 6.3. Изменение температуры слоя нефти толщиной 3 см и 1 см при начальной температуре 55 <sup>0</sup> С и температуре воды и воздуха 0 <sup>0</sup> С.....	82
Рисунок 6.4. Изменение температуры в верхнем слое воды при толщине нефти 3 см при начальной температуре 55 <sup>0</sup> С и начальной температуре воды и воздуха 0 <sup>0</sup> С.....	82
Рисунок 6.5. Изменение температуры нефтепродукта на расстояниях 0.1, 0.5 и 0.75 h от поверхности воды при толщине слоя нефти h=30мм, при T <sub>0</sub> =55 <sup>0</sup> С. Красными линиями показан диапазон температуры текучести. ....	82
Рисунок 6.6. Изменение температуры воды на расстояниях h и 2h и 3h от поверхности при толщине слоя нефти h=3см.....	83
Рисунок 6.7. Изменение температуры нефти на расстояниях 0.1, 0.5 и 0.75 h от поверхности воды при толщине слоя нефти h=10 мм, при T <sub>0</sub> =55 <sup>0</sup> С.....	83
Рисунок 6.8. Изменение средней температуры нефти в сценариях 1–3 при температуре окружающей воды 5 <sup>0</sup> С.....	84
Рисунок 6.9. Средняя толщина разлива для сценариев 1–3.....	86
Рисунок 6.10. Границы Печорского моря.....	87
Рисунок 6.11 Ледовая обстановка в Баренцевом море в мягкую (а), умеренную (б) и суровую (в) зимы в январе....	89
Рисунок 6.12 Ледовая обстановка в Баренцевом море после мягкой (а), умеренной (б) и суровой (в) зимы в апреле.....	90
Рисунок 6.13. Условные обозначения, соответствующие [Номенклатура морских льдов, 1974].....	90
Рисунок 6.14. Скорость ветра (м/с) 28 декабря 1989 г. по данным спутникового скаттерометра. ....	93
Рисунок 6.15. Сеточная область расчета ветровых волн в Баренцевом море. ....	94
Рисунок 6.16. Вероятности превышения скорости ветра 10 м/с (%) во вторую половину безледного периода (сентябрь–декабрь) для трех десятилетий: (а) 1980–1989 гг., (б) 1990–1999 гг., (в) 2000–2009 гг. ....	95
Рисунок 6.17. Функции распределения скорости ветра в четырех точках в окрестности платформы Приразломная в 2000–2009 гг. для трех сезонных периодов: май–август (V-VIII, синие линии), сентябрь–декабрь (IX–XII, красные линии) и весь год (I–XII, черные линии). ....	96
Рисунок 6.18. Функции распределения скорости ветра в точке 3 у терминала Варандей в 1980–1989, 1990–1999 и 2000–2009 гг. для трех сезонных периодов: май–август (V-VIII, синие линии), сентябрь–декабрь (IX–XII, красные линии) и весь год (I–XII, черные линии). ....	96
Рисунок 6.19. Розы ветров для первой половины безледного периода (май – август) за 1999–2009 гг. в четырех точках.....	97
Рисунок 6.20. Розы ветров для второй половины безледного периода (сентябрь–декабрь) за 1999–2009 гг. в четырех точках.....	98
Рисунок 6.21. Вероятности превышения высот волн 3 м (%) во вторую половину безледного периода (сентябрь–декабрь) для трех десятилетий: (а) 1980–1989 гг., (б) 1990–1999 гг., (в) 2000–2009 гг. ....	99
Рисунок 6.22. Функции распределения высот волн в четырех точках в окрестности платформы Приразломная в 2000–2009 гг. для трех сезонных периодов: май–август (V-VIII, синие линии), сентябрь–декабрь (IX–XII, красные линии) и весь год (I–XII, черные линии). ....	100
Рисунок 6.23 Среднегодовое распределение температуры воды в Баренцевом море.....	101
Рисунок 6.24 – Вертикальные профили средней месячной температуры воды в Печорском море (по: Гидрометеорология..., 1990).....	102
Рисунок 6.25 – Вертикальные профили средней месячной солености воды в Печорском море (по: Гидрометеорология..., 1990).....	104
Рисунок 6.26 – Вертикальные профили средней месячной условной плотности воды в Печорском море (по: Гидрометеорология..., 1990).....	105
Рисунок 6.27.Блок-схема ретроспективного воспроизведения гидрометеорологических полей.....	106
Рисунок 6.28. Расчетная область для модели WRF.....	107
Рисунок 6.29. Топография модели морской циркуляции.....	108



## Список таблиц

Таблица 2.1. Сценарии технической аварии, сопровождающиеся разливами нефти и нефтепродуктов при функционировании ВНОТ .....	12
Таблица 2.2. Основные свойства нефтепродуктов .....	13
Таблица 2.3. Свойства нефтепродуктов по узким фракциям.....	14
Таблица 2.4. Изменение свойств судового топлива при выветривании .....	14
Таблица 2.5.ООПТ Печорского моря.....	18
Таблица 2.6. Морские и приморские территории, относящиеся к «теневому» Рамсаарскому списку в пределах Ненецкого автономного округа, не входящие целиком в состав существующих ООПТ .....	19
Таблица 5.1 Расчетные значения количества (тонны) судового топлива на поверхности (ТП), испарившегося (ТИ) и диспергированного (ТД) и площади загрязнения (Пл) .....	33
Таблица 5.2 Расчетные значения количества (тонны) судового топлива на поверхности (ТП), испарившегося (ТИ) и диспергированного (ТД) и площади загрязнения (Пл) .....	33
Таблица 6.1. Среднеголетние сведения о ледовом покрове в Печорском море .....	87
Таблица 6.2. Ледовитость юго-восточной части Баренцева моря за 1996 - 2003 гг., %.....	88
Таблица 6.3 – Характеристики температуры воды на ГМС Варандей за 1972–2012 гг., °С.....	103
Таблица 6.4 – Среднемесячная многолетняя температура воды на ГМС Ходовариха по данным наблюдений за 1975–2012 гг., °С.....	103

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В работе представлены результаты выполнения работ по моделированию разливов нефти при различных сценариях развития аварийных и чрезвычайных ситуаций для разработки ПЛРН и ОВОС Варандейского нефтяного отгрузочного терминала (ВНОТ).

Моделирование распространения разливов нефти – это исследование возможных вариантов развития аварийной ситуации, связанных с попаданием в море нефти и нефтепродуктов. До тех пор, пока разлив нефти не произошел, его возможные последствия, а также эффективность мероприятий для минимизации его вредных последствий можно оценить только с привлечением методов математического моделирования.

Воздействие разливов нефти на морскую среду может иметь самый разнообразный характер и определяется условиями, в которых происходит разлив. Негативные последствия аварий зависят от ряда факторов, среди которых близость места сброса нефти к уязвимым участкам акватории и побережий, объем и продолжительность сброса, тип нефти или нефтепродукта, сложившиеся в момент аварии гидрометеорологические условия. Крупная авария может оказать серьезное краткосрочное воздействие на окружающую среду и привести к тяжелым последствиям для экосистем и населения загрязненного побережья. Характер и длительность последствий разлива нефти зависят от многих факторов. К ним относятся количество и тип разлитой нефти, гидрометеорологические условия в районе разлива нефти. Другими ключевыми факторами являются состав биоты в области нефтяного загрязнения, экологическая и промысловая значимость видов и их восприимчивость к нефтяному загрязнению. Последствия разлива также в существенной мере определяются выбором методов борьбы с разливом и эффективностью проведения соответствующих операций. В силу природно-климатических условий восстановление природной среды от негативных последствий загрязнений в дальневосточных и арктических регионах требует больше времени, чем в более теплых южных районах.

Основные задачи моделирования:

- Выполнить моделирование траекторий распространения разлитой в море нефти для сценариев разливов нефти, определенных Техническим заданием.
- Рассчитать зоны риска распространения нефти и оценку вероятности воздействия нефтяных разливов на уязвимые объекты на акватории и побережьях;
- Выявить береговые зоны с риском загрязнения нефтью или нефтепродуктами;
- Оценить вероятность загрязнения берегов нефтью;
- Оценить выветривание и изменение характеристик нефти;
- Оценить изменение геометрических характеристик пятна нефти во времени при различных скоростях ветра;

Для моделирования использована методология риск-анализа распространения разливов нефти [Зацева и др., 2014]. Концепция риск-анализа заключается в том, что возникновение аварийной ситуации обусловлено совокупностью случайных событий природного и техногенного характера, включает человеческий фактор и труднопредсказуемо. Когда и где произойдет разлив нефти, сколько нефти или нефтепродуктов попадет в море и какие при этом будут метеорологические условия, заранее неизвестно.

Важное замечание. Все оценки вероятности воздействия на уязвимые ресурсы, приведенные в отчете, рассчитаны в предположении, что авария, связанная со сбросом нефти в морскую среду, произошла, то есть имеют смысл *условной вероятности*. Так как воздействие

разлива на окружающую среду наступает только *при условии возникновения аварии*, то полная вероятность события (воздействия на ООПТ) равна произведению вероятности аварии на соответствующую условную вероятность. Вероятность каждого из возможных сценариев технической аварии – прорыв ПМТ, столкновение судов и т.п. – оценивается отдельно.

Оценки вероятности воздействия на участки побережий и акватории рассчитаны в предположении, что никаких мер противодействия разливу не предпринималось.

Отдельно необходимо отметить, что авария и последующее распространение разливов нефти и нефтепродуктов могут произойти в любое время года, в том числе, в период, когда акватория покрыта дрейфующим льдом различной сплоченности. Разрыв подводного трубопровода может приводить к тому, что нефтяное пятно будет некоторое время распространяться под ледовым покровом. Поскольку транспортировка нефти происходит при температуре порядка 50<sup>0</sup>С, а остывание до температуры текучести происходит в течение минут и десятком минут, то «горячая нефть» может растопить небольшой (несколько сантиметров) слой льда и, таким образом, быть связанной с дрейфом ледового образования до момента его таяния.

Негативные последствия загрязнения морей нефтью и нефтепродуктами в случае аварийного сброса могут быть существенно уменьшены в случае своевременного принятия адекватных мер для локализации и ликвидации загрязнения. Последнее возможно при наличии информации о том, где, когда, с какой вероятностью и в каких количествах может появиться нефть в случае аварийного разлива. То есть оперативное прогнозирование распространения разлива нефти при аварии является столь же значимым элементом реагирования, как и подготовка сил и средств борьбы с разливом.

Структура отчета. В разделе 2 приведены: общее описание исходных данных для моделирования, которые включают общее описание объекта, сценарии моделирования согласно Техническому заданию, описание физико-химических свойств рассматриваемых нефтепродуктов, краткий анализ географических и гидрометеорологических условий региона, а также особо охраняемых территорий, которые потенциально могут подвергнуться воздействию при аварии. Раздел 3 посвящен описанию основных терминов и описанию методологии моделирования и требований, которые сегодня предъявляются к используемым при моделировании моделям. Раздел 4 содержит описание риск – анализа, определения и пояснения. Раздел 5 содержит результаты моделирования по сценариям технических аварий согласно Техническому заданию, эти данные включают характеристики выветривания и параметры, описывающие геометрические характеристики разлив в различных гидрометеорологических условиях, вероятности достижения разливом акватории и берегов в результате статистической обработки сценариев их распространения за промежуток времени в 20 лет, детальные характеристики распространения разлива для отдельных гидрометеорологических сценариев. Приложения содержат описание процессов эволюции физико-химических свойств нефтепродуктов в разливе, описание особенностей эволюции высоковязких и имеющих высокие значения температуры потери текучести, описание модели эволюции нефтяного разлива, в том числе, в ледовых условиях. Кроме того, раздел содержит описание гидрометеорологических условий Печорского моря, описание тематических наборов данных и, соответствующих этим данным моделей атмосферной и морской циркуляции.

## 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 2.1. Сценарии технических аварий на ВНОТ<sup>1</sup>

В морскую часть Варандейского нефтяного отгрузочного терминала (ВНОТ) входит стационарный морской ледостойкий отгрузочный причал (СМЛОП) и подводный морской трубопровод (ПМТ).

СМЛОП – морская стационарная ледостойкая свайная платформа, установленная в пределах территориального моря РФ, на дистанции 22,6 км от берега в точке с географическими координатами 69° 03' 11,107" с.ш., 58° 09' 07,545" в.д. СМЛОП - сооружение, включающее в себя ледостойкое опорное основание, закрепленное на грунте, и верхнее строение. Верхнее строение включает в себя надстройку, стоящую на главной палубе опорного основания, и швартовно-грузовое устройство (ШГУ), расположенное над надстройкой. ШГУ состоит из поворотной башни, взлетно-посадочной площадки и отгрузочной стрелы с устройствами, трубопроводами и шлангом для отгрузки нефти на танкер. Нефть загружается в носовую часть танкера из ШГУ при помощи гибкого шланга. СМЛОП предназначен для бесконтактного круглогодичного налива нефти в танкеры как в безледовый период, так и в ледовых условиях, а также для выполнения технических операций по обслуживанию морского нефтепровода.

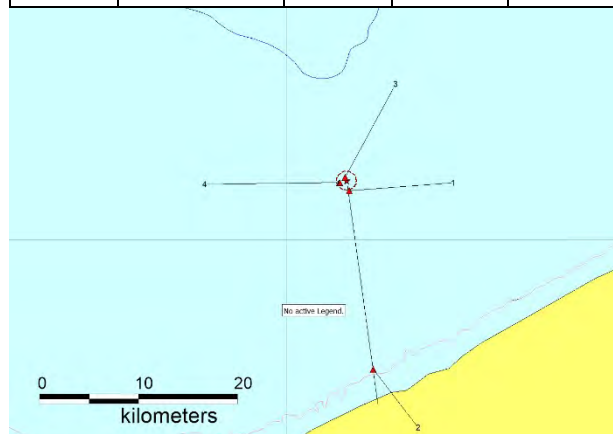
Для моделирования распространения нефтяных разливов Заказчиком были определены 4 сценария технической аварии, сведения о которых приведены в Таблице 1. При моделировании были использованы сведения о физико-химических свойствах нефти, типичной для рассматриваемого региона (Таблицы 2).

Таблица 2.1. Сценарии технической аварии, сопровождающиеся разливами нефти и нефтепродуктов при функционировании ВНОТ

Название	Координаты	Объем, м3	Продолжительность	Тип нефтепродукта	Комментарий
ТА1	58.158351 69.044135	422,5	210 сек	Нефть	разгерметизации одной нитки подводного участка трубопровода от береговых резервуаров до СМЛОП
ТА2	58.218491 68.883442	1493	980 сек	нефть	Разгерметизации трубопровода (3 км от берега), сопровождающейся сбросом нефти при напорном режиме и свободным истечении до включения системы откачки нефти из поврежденного трубопровода во вторую нить трубопровода с транспортом в береговые резервуары
ТА3	58.158351	8434	Залп	Нефть	Авария танкера с двойным дном,

<sup>1</sup> В разделе рассматриваются сценарии технических аварий (см. раздел 4.1)

	69.044135				используемого для транспорта нефти
ТА4	58.158351 69.044135	1800	залп	Мазут	разлива топлива с судна обеспечения



а)



б)

Рисунок 2.1 Положение точек возможных сбросов нефти на карте (а) и на схеме (б)

## 2.2. Физические свойства нефти и судового топлива

Таблица 2.2. Основные свойства нефтепродуктов

№, пп.	Наименование показателя	Значение
<b>Нефть</b>		
1	Плотность нефти при 20°C, кг/м	829
2	Плотность нефти при 15°C, кг/м	835,08
3	Плотность нефти в градусах API	37.86
4	Массовая доля воды, %	0.05
5	Выход фракций, % при температуре до 200°C	24,6
6	Выход фракций, % при температуре до 300°C	46,5
7	Температура застывания, °C	18 ÷ 22
8	Температура перекачки нефти по трубопроводу, °C	до 55.
<b>ИФО-180</b>		
1	Плотность при 15°C, кг/м	Менее 960
2	Температура застывания, °C	Ниже минус 5
3	Кинематическая вязкость (15°C), сП	2470

4	Температура в танках танкера, °С	29
---	----------------------------------	----

Таблица 2.3. Свойства нефтепродуктов по узким фракциям

№ фракции	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Свойства нефти по узким фракциям</b>										
Т кипения, °С	100	120	150	180	200	220	240	280	300	350
Молекулярный вес	92	105	120	140	153	167	182	214	231	273
Плотность, API	68	60	52	46	42	39	36	32	30	26
Плотность, [кг/м <sup>3</sup> ]	710	740	769	798	815	830	843	866	876	895
Массовая доля, %	2	2	3	5	3	4	5	12	7	57
Доля фракции (интегрально)	2	4	7	13	16	20	25	36	43	100
<b>Свойства судового топлива (ИФО-180) по узким фракциям</b>										
Т кипения, °С	311	343	378	410	429	438	450	459	485	548
Молекулярный вес	234	265	298	333	362	378	390	403	424	482
Плотность, API	30	27	25	22	20	19	18	16	14	8
Плотность, [кг/м <sup>3</sup> ]	877	892	906	921	934	942	949	956	969	1013
Массовая доля, %	1	3	4	5	7	8	11	13	20	28
Доля фракции (интегрально)	5	10	15	20	25	30	40	50	74	100

Таблица 2.4. Изменение свойств судового топлива при выветривании

Доля испарившегося нефтепродукта (об. %)	0	0.9	4.6
Плотность (кг/м <sup>3</sup> )			
15°С	960	964	967
25°С	957	958	960
Вязкость, (мПа*сек)			
15°С	2471	2849	5060
25°С	929	1033	1625
Межфазное натяжение (дин/см)			
Нефть/воздух	35.1	36.4	38.3
Нефть/вода	21.1	21.8	21.8
Точка текучести, °С	-9	0	3
Образование эмульсии:			
Индекс стабильности	Достаточно стабильно	Нестабильно	Нестабильно
Содержание воды. (%)	26	0	0

### 2.3. Оценка возможности образования эмульсии «вода в нефти»

С точки зрения противодействия разливам и стойкости к образованию пятен эмульгирование является негативным процессом, поскольку сильно эмульгированные типы нефти обладают высокой вязкостью-их вязкость может в десять-100 раз превышать вязкость исходного нефти. В целом считается, что типы нефти с относительно высокой концентрацией асфальтенов с наибольшей вероятностью образуют стабильные эмульсии вода-в-нефти. Некоторые разливы нефти не образуют эмульсию сразу, но как только происходит испарение и концентрация асфальтенов увеличивается, начинается процесс эмульгирования, который обычно протекает быстро после этого.

Нефть и нефтепродукты на поверхности воды могут образовывать эмульсии «вода в нефти», которые классифицируют как устойчивые, среднеустойчивые (время существования - несколько дней) и неустойчивые (время существования - несколько часов). Среднеустойчивые

эмульсии содержат асфальтенов и смол больше 3% (но меньше 7%). При содержании асфальтенов более 7% образуется устойчивая эмульсия [Fingas et al., 1999].

Для определения устойчивости эмульсии [Xie et al., 2007] вводится индекс стабильности  $S = 0.5(S_1 + S_2)$ , определяемый по значениям содержания в нефти смол и асфальтенов. Устойчивые эмульсии образуются при  $S \geq 1.22$ , среднеустойчивые – при  $0.67 \leq S < 1.22$  и неустойчивые – при  $S < 0.67$ .

$$S_1 = X_a \exp[K_{ao}(1 - X_a - X_w)^2 + K_{aw}X_w^2] \exp[-0.04(T - 293)],$$

$$S_2 = \begin{cases} (0.04CCI + W_s) / 5.6 & \text{при } 5.24CCI - 9W_s \geq 0 \\ CCI / 9.0 & \text{при } 5.24CCI - 9W_s < 0 \end{cases}$$

$$CCI = Asph + Res + 0.4Wax$$

где  $K_{ao} = 3.3$  при  $293 \text{ } ^\circ K$ ,  $K_{aw} = 200$  при  $293 \text{ } ^\circ K$ ,  $T$  - температура ( $^\circ K$ ),  $X_a$  - содержание асфальтенов,  $X_w$  - содержание парафинов,  $W_s$  - скорость ветра,  $CCI$  - индекс химического состава (Chemical Composition Index);  $Asph$  - процентное содержание асфальтенов;  $Res$  - процентное содержание смол;  $Wax$  - процентное содержание парафинов.

В работе [Rasmussen, 1985], используется следующая модель для определения содержания воды в нефти.

$$\frac{dF_{wo}}{dt} = R_1 - R_2, \quad R_1 = \frac{k_{1e}}{\mu_{oil}}(1 + W_{10})^2 (F_{fin} - F_{wo}), \quad R_2 = \frac{k_{2e}}{\mu_{oil}} \frac{1}{Asph \times Wax} F_{wo},$$

где  $F_{wo}$  - объемное содержание воды в эмульсии,  $F_{fin}$  - конечное содержание воды в эмульсии (как правило, используется  $F_{fin} = 0.7$  для сырых нефтей и  $0.5$  для мазута),  $k_{1e}$  и  $k_{2e}$  - эмпирические константы:  $k_{1e} = 5 \cdot 10^{-7}$  (кг/м<sup>3</sup>) и  $k_{2e} = 1.2 \cdot 10^{-7}$  (кг сек<sup>2</sup>/м)  $\mu_{oil}$  - вязкость нефти.

Согласно имеющимся экспертным оценкам, время приближения содержания воды в эмульсии вода-в-нефти для легкой нефти к максимальному его значению в зависимости от условий волнения составляет от нескольких часов до полусуток. При этом вязкость рассматриваемой в проекте нефти на три – пять порядков больше по сравнению с вязкостью легкой нефти. Вязкость в приведенной модели Расмуссена присутствует в знаменателе и многократно большее значение этого параметра приведет к увеличению времени формирования эмульсии в тысячу и более раз по сравнению с легкой нефтью, что значительно превышает время остывания нефти в морской среде до температуры потери текучести, которое не превышает двух-трех часов.

Следовательно, вне зависимости от содержания асфальтенов смол и парафинов процесс эмульсификации не будет иметь какого-либо развития для этого типа нефти.

На основании лабораторных испытаний свежее топливо IFO180 имеет умеренную тенденцию к образованию стабильных эмульсий типа "вода в масле" при смешивании с морской водой. 0,9 и 4,6% выпаренного IFO180 не образовывали эмульсий в лабораторных испытаниях. Это может быть связано с повышенной вязкостью выветрившегося мазута и невозможностью смешивания капель воды с более вязким нефтепродуктом. Кроме того, испытания судового топлива показывают<sup>2</sup>, что даже 4% испарившихся фракций смещают точку

<sup>2</sup> Spill Related Properties of IFO180 Fuel Oil // SL Ross Environmental Research Ltd., September 2004

текучести в область положительных температур. В результате пролитое в море судовое топливо также будет образовывать комки и «лепешки» спустя несколько дней после сброса в море.

## 2.4. Сведения о продолжительности светового дня на объекте

На Рисунке 2.2 представлено изменение продолжительности светового дня в зависимости от номера сценария гидрометеорологических условий (ГМУ) или времени начала аварии, отсчитываемой от начала года.



Рисунок 2.2. Продолжительность светового дня в районе МСЛОП в зависимости от времени от начала года (номера сценария)

## 2.5. Сведения об изменении приливного уровня моря на объекте

Литораль - участок берега, который затопляется морской водой во время прилива и осушается во время отлива. Располагается между самым высоким уровнем воды в прилив и самым низким в отлив.

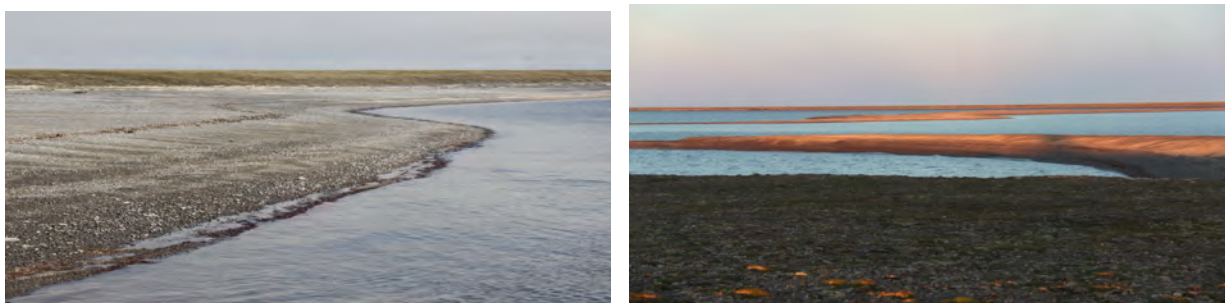


а)



б)





в)

г)

Рисунок 2.3. Фотографии литоральной зоны Варандея (а, б) и острова Долгий (в, г)

Широкая литораль побережий на побережье Варандея и на ряде островов в Печорском море приводит к тому, что при выносе нефти в прибрежную зону, сопровождающемся понижением приливного уровня, значительная часть нефтяного загрязнения оказывается на осушенном участке литорали, связывается с песком и более не смывается водой.

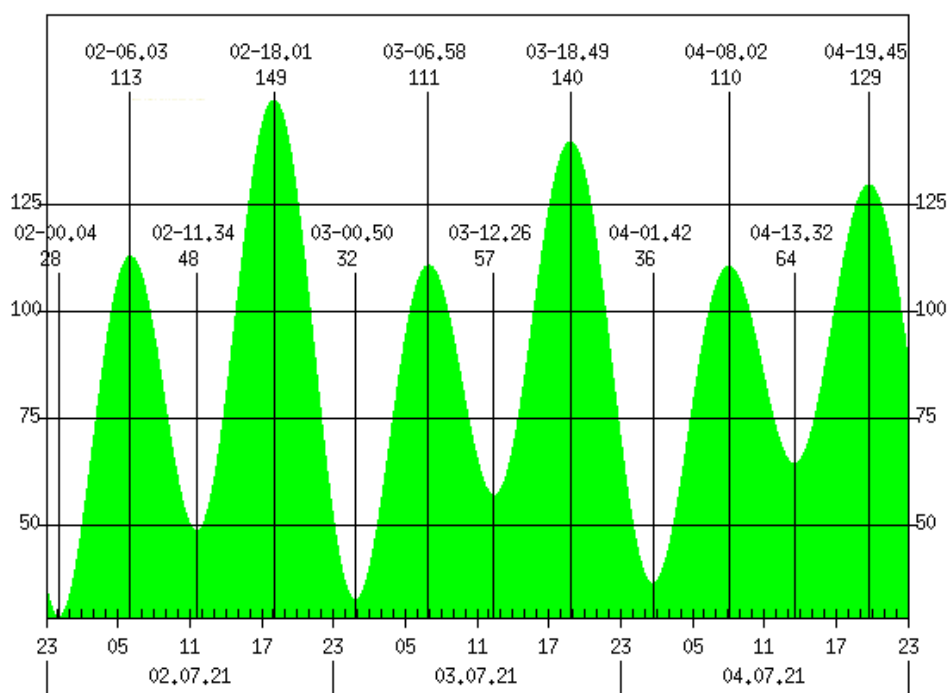


Рисунок 2.4. Ход приливного уровня моря в пункте Варандей<sup>3</sup>

<sup>3</sup> <http://www.oceanography.ru/index.php/2010-12-01-06-45-18>

На дату: 02.07.2021

68.8 : Широта, град.  
 57.98 : Долгота, град.  
 неправильный полусуточный : Характер прилива  
 Негармонические постоянные берегового пункта:

86 : Средний уровень (Z<sub>0</sub>) относительно НТУ, см  
 167.8 : Максимальная величина прилива ВТУ, см  
 4.83 : Прикладной час порта, час  
 3.67 : Возраст полусуточного прилива, сут  
 5.9 : Время роста, час  
 6.52 : Время падения, час  
 132.75 : Средняя величина сизигийного прилива, см  
 53.32 : Средняя величина квадратурного прилива, см

## 2.6. ООПТ, находящиеся в зоне риска возможного загрязнения нефтью

Максимальный расчетный разлив от аварийного танкера или прорыва трубопровода (МПТ) в районе МСЛОП может приводить к загрязнению берегов Печорского моря.

В зоне влияния разлива нефти при сбросе нефти находится ряд особо охраняемых природных территорий (ООПТ), расположение и характеристики которых показаны Рисунке 2.4 и в Таблицах 2.4 и 2.5.

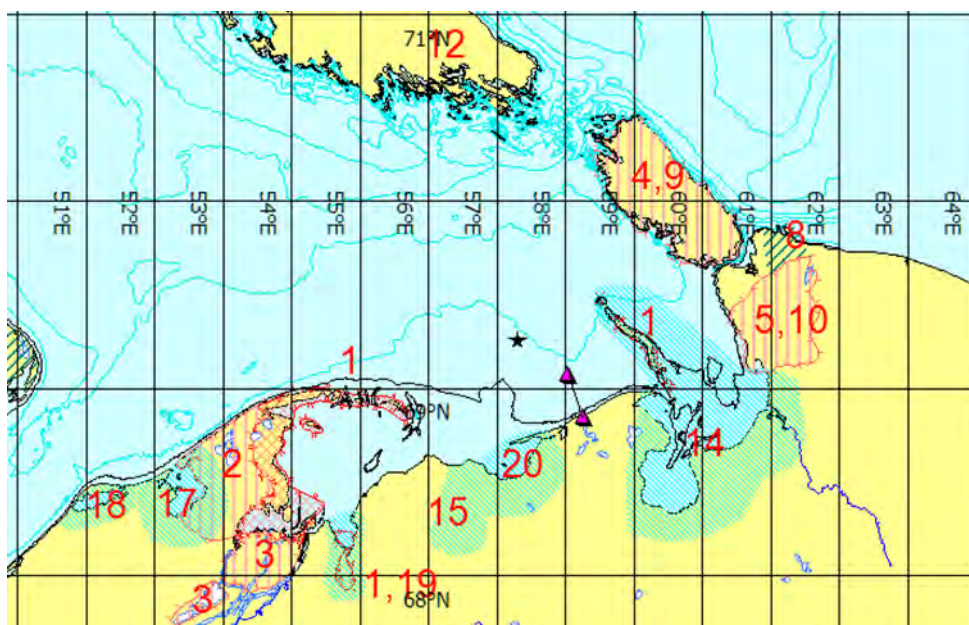


Рисунок 2.5. Карта ООПТ, входящих в зону влияния разливов

Таблица 2.5. ООПТ Печорского моря

№	Название	Категория ООПТ
	Ненецкий	Заповедник
	Ненецкий	Заказник (зоол.)
	Нижнепечорский	Заказник
	Вайгачский	Заказник (охот.)
	Большеземельский	Заказник
	Шоинский	Заказник (охот.)

№	Название	Категория ООПТ
	Колгуев	территория традиционного природопользования
	Путь Ильича	территория традиционного природопользования
	Вайгач	территория традиционного природопользования
	Югорский	Заказник
	Междушарский	природный исторический заказник
	Новая Земля	Национальный парк
	Крест-То	Заказник

Таблица 2.6. Морские и приморские территории, относящиеся к «теневому» Рамсаарскому списку в пределах Ненецкого автономного округа, не входящие целиком в состав существующих ООПТ

№	Наименование	Местоположение	Принадлежность
	Хайпудырская губа Баренцева моря	Юго-восточная часть Баренцева моря, побережье и Хайпудырская губа с островами Зеленец, Долгий, Голец и Матвеев.	Острова Хайпудырской губы - ключевая орнитологическая территория международного значения, 3-й участок заповедника «Ненецкий».
	Река Черная	Долина р.Черная от притока Урерьяха до впадения в Баренцево море, а также окружающая тундра	Ключевая орнитологическая территория международного значения.
	Южное побережье Чешской губы	Южная часть Чешской губы в районе рек Снопа, Ома, Вижас, Перепуск	Ключевая орнитологическая территория международного значения.
	Колоколова губа	Побережье Тиманского берега Баренцева моря, 25 км восточнее Сенгейского пролива.	Частично входит в состав заказника «Ненецкий»
	Остров Сенгейский и Сенгейский пролив	Юго-западная часть Печорского моря. 70 км к западу от пос. Тобседа.	
	Болванская губа	Морской залив между р. Хыльчу-Ю и р. Печора.	Частично входит в состав заповедника «Ненецкий»

№	Наименование	Местоположение	Принадлежность
	Паханчская губа	Морской залив между населенными пунктами Бачуркой и Варандей и островом Песяков	

Морские участки ООПТ можно объединить в группы, как показано на Рисунке 2.5.

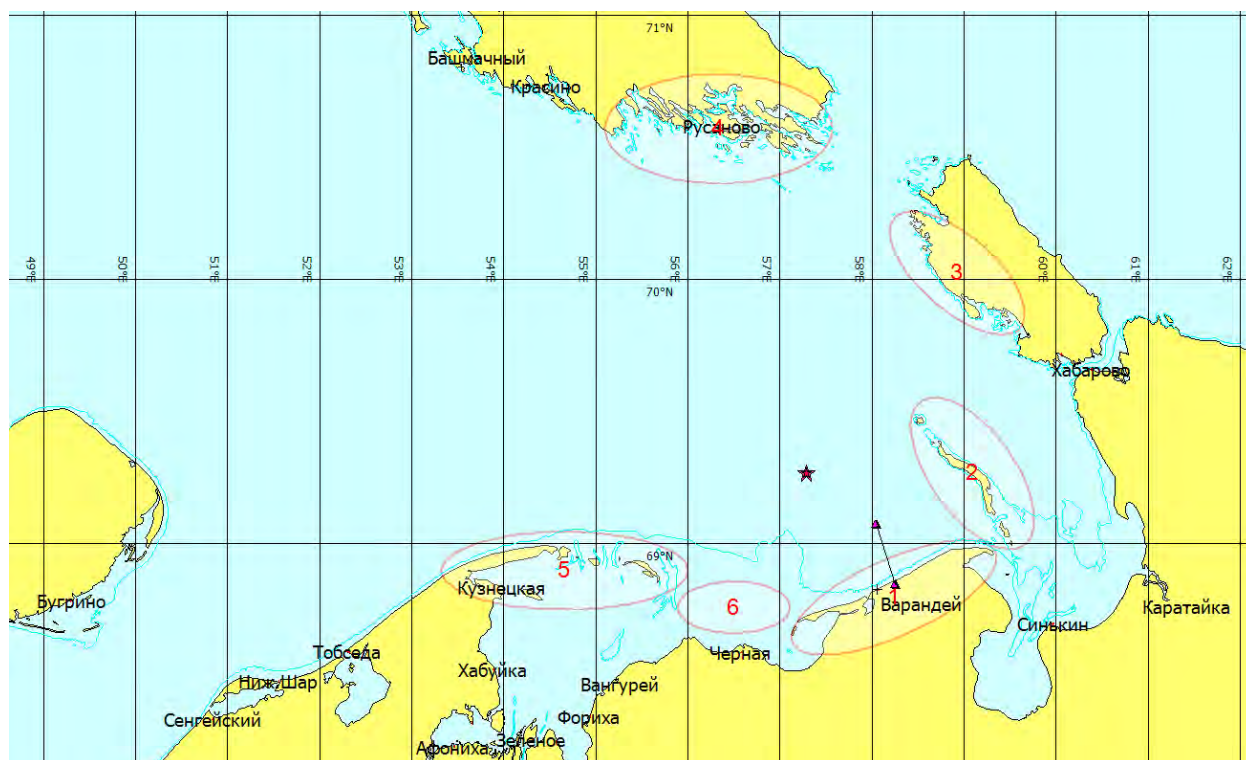


Рисунок 2.6. Группировка ООПТ для оценки вероятности воздействия

Номера ООПТ в подписи Рисунка 2.4:

- 1- зона Варандея (остров Песяков, остров Варандей, п-ов Варандейская лапта, территории, прилегающие к поселку Варандей);
- 2- остров Долгий, Матвеева, Большой и Малый Зеленец;
- 3 - остров Вайгач и прилегающие мелкие острова;
- 4 - южная оконечность Новой Земли;
- 5 - п-ов Русский заворот и Гуляевские Кошки (западные);
- 6 - группа мелких островов из Гуляевских кошек (восточные)<sup>4</sup>;
- 0 - побережья Печорского моря, не попавшие в указанные ООПТ

<sup>4</sup> Из-за небольшого размера этих островов, они не были учтены при гидродинамических расчетах. По этой причине оценка воздействия на Зону 6 не проводилась

### 3. МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Авария, связанная с разливом нефти или нефтепродуктов в морскую среду, может случиться в любой момент времени, относящийся к периоду (сезону) производственной активности, в любое время дня и ночи. Поскольку нет оснований для противного, то будем считать, что все моменты времени «будущей гипотетической аварии» равновероятны. Таким образом, риск воздействия разливов нефти для всех уязвимых объектов в районе, где проводится разведка, добыча или транспортировка нефти, будет зависеть от особенностей гидрометеорологических условий.

Эволюция нефтяного разлива в морской среде определяется большим набором характеристик гидрометеорологического режима. Распространение нефти от источника сброса обусловлено исключительно ветром и течениями различной природы – дрейфовых, сгонно-нагонных и приливных, бароклинных и волновых. Современные численные модели гидротермодинамики атмосферы океана позволяют реконструировать/восстановить поля основных гидрометеорологических характеристик. Рассчитанные поля течений, приводного ветра, температуры и солености морской воды являются основой для создания гидрометеорологических сценариев, в которых может развиваться аварийный разлив нефти.

Определив аварийную ситуацию как случайное событие, определим риск как вероятность возникновения неблагоприятных для природной среды последствий. Важно понимать, что вероятность воздействия на конкретные объекты в морской среде и на побережье в результате распространения разлива нефти всегда будет определяться как условная, так как абсолютное значение вероятности воздействия будет зависеть от вероятности технической аварии соответствующего уровня.

#### 3.1. Сценарии гидрометеорологических условий

Изменение положения, конфигурации, массы и физико-химических показателей нефтяного разлива зависит от гидрометеорологических характеристик в приводном слое атмосферы над морем и приповерхностном слое воды.

Комплексы математических моделей, описывающих процессы в океане, атмосфере и на границе раздела дают возможность расчетным путем восстановить/реконструировать необходимые характеристики природной среды, которые оказывают влияние на эволюцию нефтяного разлива после аварийного сброса в море. Реконструкция гидрометеорологических условий (ГМУ) в регионе интереса предполагает, что посредством процедуры усвоения используются все собранные соответствующими метеорологическими службами данные наблюдений, а недостающая информация в точках, где не было наблюдений, или параметры, которые не измерялись, восстанавливаются расчетным путем.

Как правило, реконструкция ГМУ основывается на данных реанализа метеорологических параметров, который проводится в крупных научных центрах, таких как Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) или Американское агентство по исследованию природной среды (NCEP/NCAR). Данные метеорологического реанализа используются как граничные условия для моделей расчета течений, уровня и гидрологических характеристик в море/океане, а также моделей ветрового волнения либо непосредственно, либо после обработки программой гидродинамической интерполяции WRF.

В результате реконструкции ГМУ рассчитываются поля приводного ветра, течений, солености, температуры и плотности морской воды на различных горизонтах за период времени, позволяющий исключить межгодовую изменчивость гидрометеорологических процессов. Для замерзающих морей к перечисленным гидрометеорологическим параметрам желательно добавить сведения о ледовых условиях, согласованные с расчетами ветра и течений. Пространственное разрешение метеорологических и гидрологических моделей должно быть достаточным для описания особенностей гидрометеорологического режима в регионе интереса. Выходная продукция моделей должна соответствовать пространственно-временной изменчивости описываемых процессов и для большинства задач предоставляется с временной дискретностью 1 час. Таким образом, каждый год реконструкции представляется, как минимум, 8760 полями ( $365 \cdot 24 = 8760$ ) значений каждого из необходимых гидрометеорологических элементов на каждом расчетном горизонте.

После того, как реконструированные поля гидрометеорологических параметров рассчитаны, из них может быть составлен ансамбль гидрометеорологических ситуаций/сценариев. Каждый сценарий ГМУ представляет собой набор последовательных полей скорости ветра и течений, температуры, солености и плотности морской воды, характеристик ветрового волнения и позволяет провести моделирование эволюции нефтяного разлива под действием факторов природной среды. Обычно, каждый сценарий ГМУ в регионе интересов для целей обеспечения планирования операций ЛАРН составляется на 5-10 суток. Набор сценариев гидрометеорологических условий, каждый из которых, например, имеет продолжительность 10 суток, строится следующим образом. Первый сценарий «состоит» из набора полей с номерами от 1-го по 240-е из рассчитанных на год данных, второй сценарий описывается набором полей со 2-го по 241-е, третий - с 3-го по 242-е и т.д..

Таким образом, имеется возможность рассчитать сценарии распространения нефтяного разлива, соответствующего тому или иному варианту технической аварии, во всем многообразии погодных условий, наблюдавшихся в регионе интересов, как правило, за последние 10 лет. Реконструкция ГМУ естественным образом включает постоянные, приливные и нагонные течения, в том числе, экстремальные штормовые ситуации в регионе. Здесь используется предположение о квази-постоянстве гидрометеорологического режима для региона интереса, т.е., предполагается, что в ближайшем будущем климатические условия в регионе будут не слишком отличаться от тех, что были в недалеком прошлом.

Все сценарии ГМУ равновероятны и зависят лишь от выбора момента времени, который может быть ассоциирован с моментом начала аварии, внутри 10 - ти летнего периода.

### **3.2. Сценарии распространения нефти**

На основании сценария ГМУ рассчитывается сценарий распространения аварийного разлива нефти или нефтепродукта. В рамках сценария рассчитываются последовательные положения разлива, обусловленные переносом нефти по поверхности моря совокупным действием ветра и течений, оцениваются изменения геометрических (площадь, толщина, линейные размеры) и физико-химических характеристик разлива нефти, таких как плотность и вязкость, изменяющиеся в результате выветривания нефти. Информация по каждому конкретному сценарию распространения нефти предоставляется в виде таблиц зависимостей от времени основных характеристик нефтяного разлива: координаты, площадь, количество испарившейся и диспергированной нефти, плотность остатка, количество воды в нефти.

Сценарии распространения разлива или нефтепродуктов нефти могут быть обработаны для получения статистических характеристик возможного воздействия разлива на уязвимые объекты в морской среде и в прибрежной зоне.

Определенные проблемы связаны с расчетом продолжительных сценариев сброса нефти, которые, вообще говоря, могут продолжаться достаточно долго, вплоть до нескольких дней и даже недель. В этом случае, эффективным представляется разбиение продолжительного разлива на серию часовых сбросов. При обработке результатов моделирования распространения «порций» нефтяного разлива могут быть получены сведения и о протяженности подобного разлива, и об изменении физико-химических характеристик его отдельных частей.

### **3.3. Требования к моделям распространения нефти**

В соответствие современными представлениями о процессах распространения и физико-химической трансформации нефти эволюция нефтяного разлива в море контролируется переносом под действием ветра и течений, растеканием под действием сил плавучести и рассеянием за счет турбулентной диффузии, а также испарением, диспергированием, эмульгированием, изменением плотности и вязкости остатка на поверхности. Математические модели расчёта распространения и трансформации нефтяного разлива должны воспроизводить эти явления.

Следует учитывать, что нефть и нефтепродукты представляют смесь отдельных фракций, каждая из которых имеет присущие ей физико-химические свойства, такие, как температура кипения, плотность, вязкость, поверхностное натяжение, молекулярный вес и пр.). Модель для расчета распространения нефтяных разливов должна описывать эволюцию фракционного состава, изменение физико-химических свойств нефти на поверхности моря, эволюцию плотности, процессы эмульгирования за счет процессов испарения, диспергирования и растворения компонент нефти в воде.

Вне зависимости от того, как нефть оказывается в водной среде (в результате действия поверхностного или подводного источника), она находится в ней в виде плавающего на поверхности пятна и в виде взвешенных в водной толще капель. Между нефтяным разливом и водной толщей происходит постоянный обмен нефтяными каплями, интенсивность и направление среднего потока зависят, в том числе, от энергии ветровых волн и плотности эмульсии вода в нефти в пятне на поверхности. Нефтяное пятно на поверхности воды подвержено, с одной стороны, переносу под действием течений и ветра, а, с другой стороны, - множеству процессов трансформации, упомянутых выше.

Кроме того, в морской среде происходит сорбирование нефти твердыми частицами и осаждение на дно, взаимодействие с береговой линией и/или со льдом, фотохимические реакции и биодegradация. Последние могут изменять свойства и уменьшать количество нефти за длительный период времени.

Расчет переноса (траектории) нефтяного пятна позволяет определить его положение в пространстве. Трансформационная часть моделей нефтяного разлива определяет переход нефти между различными средами (морская поверхность, атмосфера, водная толща, береговая область, лед, дно моря, биота) и изменение ее характеристик (плотности, содержания воды, вязкости).

Математические модели нефтяного разлива, используемые в риск анализе распространения разливов, должны, с одной стороны, по возможности адекватно описывать вышеперечисленные процессы трансформации нефти в морской среде. С другой стороны,

поскольку речь идет об оценке риска и необходимости моделирования десятков и сотен тысяч сценариев разлива в различных гидрометеорологических условиях, модели должны быть оптимизированы для повышения быстродействия.

Результаты риск – анализа распространения аварийных разливов нефти традиционно представляются в виде таблиц, графиков и картографической информации в виде новых слоев на цифровых картах района интереса.



#### 4. РИСК – АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАЗЛИВОВ НЕФТИ

Риск-анализ распространения аварийных разливов нефти, несмотря на уже примерно двух десятилетнюю историю (в английской литературе oil spill risk assessment), находится на границе нескольких дисциплин, среди которых гидрометеорология, экология и промышленная безопасность, все еще представляет относительно новое направление исследований. По этой причине представляется целесообразным привести в отчете небольшой глоссарий для определения терминов, использованных в тексте.

**Риск–анализ распространения нефти в море** – процедура оценки риска воздействия аварийных разливов нефти на уязвимые объекты на акватории и в береговой зоне.

**Сценарий гидрометеорологических условий** - набор последовательных полей скорости ветра и течений, температуры, солености и плотности морской воды, характеристик ветрового волнения, позволяющий описать эволюцию нефтяного разлива под действием факторов природной среды

**Сценарий распространения аварийного разлива нефти** – расчет последовательных положения и конфигурации разлива, обусловленных переносом и деформацией пятна нефти на поверхности моря за счет совокупного действия ветра и течений, оценка изменения геометрических (площадь, толщина, линейные размеры) и физико-химических характеристик разлива нефти, таких как плотность и вязкость, меняющихся в результате выветривания нефти, оценка количества испарившейся нефти и диспергированной в водную толщу.

**Сценарий технической аварии** – сведения о типе нефти или нефтепродукта, сброшенного в морскую среду в результате аварии, координаты сброса, интенсивность и продолжительность или объем сброса.

**Технический риск** - вероятность отказа технических устройств с последствиями определённого уровня (класса) за определённый период функционирования опасного производственного объекта.

**Экологический риск** - вероятность возникновения неблагоприятных для природной среды и человека последствий осуществления хозяйственной и иной деятельности.

**Приемлемый риск аварии** - риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из социально-экономических соображений.

**Свойства нефти или нефтепродукта** – плотность, вязкость, межфазное натяжение, температуры застывания и вспышки, в том числе по узким фракциям, дистилляционные характеристики.

**Зона риска** – область акватории, где разлив нефти может оказаться пределах заданных временных промежутков после начала аварии (1 день, 3 дня, 5 дней и т.д.), если не будут предприняты меры по локализации и ликвидации разлива нефти. Зоны риска представляют собой поля минимального времени достижения участков акватории. Зоны риска определяются обработкой ансамбля равновероятных траекторий движения нефтяных пятен, обусловленных гидрометеорологическими условиями рассматриваемого региона.

Оценки зон риска распространения нефти представляют экстремальные характеристики для распространения нефти и относятся к категории консервативных, т.е. сделанных с осторожностью, с запасом (conservative estimate) при максимально неблагоприятных предположениях. В тоже время интерес представляет и вероятность реализации тех или иных

последствий аварийного сброса нефти. С этой целью для каждого участка области потенциального воздействия, определяется вероятность наступления неблагоприятного события, а именно вероятность того, что в результате распространения нефти от источника, определенного метеорологическим сценарием, разлив нефти достигнет рассматриваемой области и при этом толщина пленки нефти на поверхности будет превышать предельную для операций ЛАРН.

**Вероятность достижения акватории и береговой зоны** – поле вероятности события обнаружить на поверхности моря нефтепродукты с толщиной пленки, превышающей заданный уровень, в области с предопределенными пространственными размерами, при условии, что не будут предприняты меры по локализации и ликвидации разлива нефти.

**Масштаб воздействия** – оценка линейных и площадных характеристик нефтяного разлива, изменяющихся с течением времени после сброса под действием растекания, диффузии, физико-химических процессов.

Анализ риска распространения аварийных разливов нефти в морской среде после аварийного сброса предполагает определение областей акватории и побережья, где нефтяной разлив может привести к негативным последствиям для окружающей среды, оценку вероятности достижения и воздействия разлива на конкретные объекты (например, на особо охраняемые природные территории (ООПТ)) или на произвольные районы акватории и побережья в зоне потенциального воздействия (ЗПВ).

Анализ риска распространения нефти проводится для каждого из возможных сценариев технической аварии.

Основные этапы проведения оценок риска распространения разливов нефти состоят в следующем:

- Подготовка сценариев гидрометеорологических условий на основе анализа архивных данных и реконструкции недостающей информации с помощью математических моделей, включающих модели расчета полей приземного ветра, моделей морских течений, моделей ледовой динамики.
- Подготовка сценариев возможных аварийных сбросов нефти в морскую среду при добыче и транспортировке нефти по акватории на основе анализа промышленного риска.
- Расчет возможных траекторий переноса нефтяного загрязнения и их последующий анализ с целью определения пересечений траекторий движения нефтяных slickов с экологически уязвимыми объектами на побережье и акватории.
- Расчет процессов физико-химической трансформации нефтяного разлива, за счет которых часть нефтяных фракций в результате испарения попадет в атмосферу и будет распространяться как атмосферное загрязнение, часть нефти в виде эмульсии нефть-в-воде проникнет в водную толщу и будет формировать внутримассовое загрязнение морской среды.
- Статистическая обработка результатов расчета траекторий распространения нефти с учетом процессов физико-химической трансформации разлива нефти в морской среде для определения зон поражения нефтяным разливом участков акватории за определенные промежутки времени, распределения времени достижения береговой зоны и поражения участков побережья при различных гидрометеорологических ситуациях;
- Расчеты вероятности поражения выбранных участков побережья или объектов на акватории.

Защита побережий от негативного воздействия нефтяных разливов является одним из приоритетов в операциях ЛАРН. По этой причине оценка вероятности достижения нефтью берега всегда проводится в рамках риск-анализа распространения разливов. Эти оценки зависят от сценария технической аварии.

Поскольку эволюция нефтяного разлива в морской среде существенно зависит от свойств пролитой субстанции, важным подготовительным этапом следует считать оценку возможности образования нефтью или нефтепродуктом эмульсии типа вода в нефти, приводящей к резкому росту вязкости нефтяного остатка на поверхности моря и увеличению его объема.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 5.1. Оценка выветривания нефти и судового топлива по сценариям ТА1-ТА4

Масштаб воздействия нефтяного разлива на водную среду и побережье существенно зависит от объёма разлива и интенсивности процессов выветривания нефти.

Главными составляющими процесса выветривания нефти являются процессы испарения нефтяных фракций в атмосферу и поток капель с поверхности в водную толщу за счет процессов обрушения волн и вертикального перемешивания. Минимальное выветривание соответствует периодам со слабыми скоростями ветра и практически полностью определяется испарением летучих фракций из нефтяного slicka. Максимальное выветривание происходит при сильном ветре, когда большая часть нефти попадает в виде капель в водную толщу.

Судовое топливо также имеет довольно высокую вязкость при температуре 15<sup>0</sup>С, которая увеличивается при формировании эмульсии типа вода-в-нефти. Тем не менее судовое топливо может диспергировать при высоких скоростях ветра.

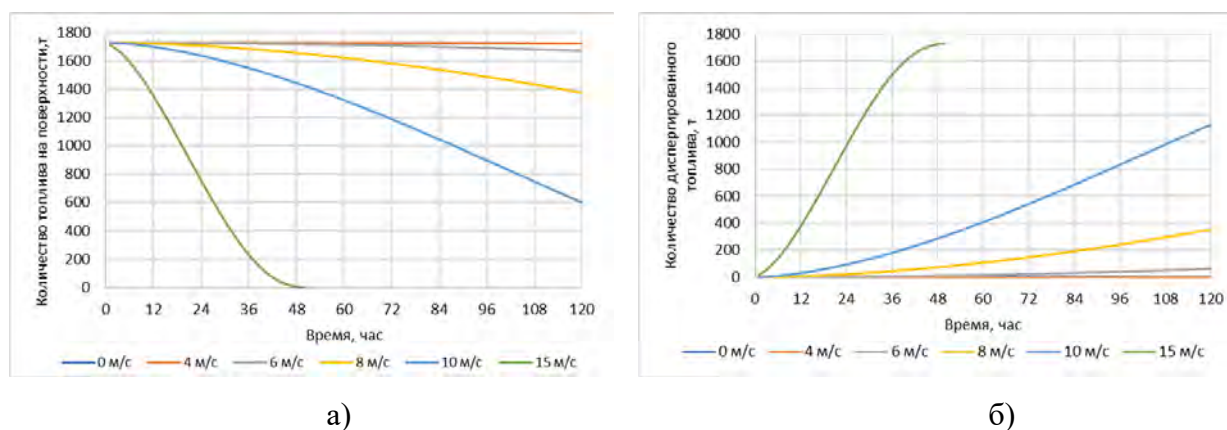


Рисунок 5.1 Примеры изменение количества судового топлива на поверхности моря (а) и количества диспергированного нефтепродукта (б) при постоянных скоростях ветра

Испарение IFO-180 крайне мало. Однако, даже несколько процентов испарившихся фракций смещают точку текучести для судового топлива в область положительных температур, так что спустя несколько дней после выветривания, судовое топливо также будет превращаться в крупные комки, из-за высокой плотности практически полностью погруженные в воду.

#### 1.1.1 Оценка выветривания<sup>5</sup> разливов в Сценарии ТА1-ТА3

Нефть, перекачиваемая по подводному трубопроводу и перевозимая на танкере, при попадании в морскую среду в течение нескольких минут (десятков минут) застывает, после чего практически не испаряется и не имеет возможности образовывать дисперсию типа нефти в воде. Таким образом, можно утверждать, что практически всё количество нефти, попавшее в море, с течением времени будет выброшено на тот или иной берег, возможно, довольно далеко от места сброса (см. Раздел 6.2)

<sup>5</sup> Выветривание нефти – удаление с поверхности моря за счет процессов испарения и диспергирования

### 1.1.2 Оценка выветривания<sup>6</sup> разливов в Сценарии ТА4

Оценка выветривания нефти и нефтепродуктов проведена по ансамблю реализаций метеорологических условий, подготовленных в составе тематического набора данных.

Линии, ограничивающие одностонные области на Рисунке 5.2, представляют соответствующие двусторонние процентилю выборки данных. Максимальное выветривание (Мах) имеет место при штормовых ситуациях и имеет малую вероятность реализации. Минимальное выветривание (Мин) происходит в штилевых условиях. Среднее (по сценариям) значение количества нефти на поверхности моря, показанное на Рисунке 5.2, примерно соответствует медиане распределения.

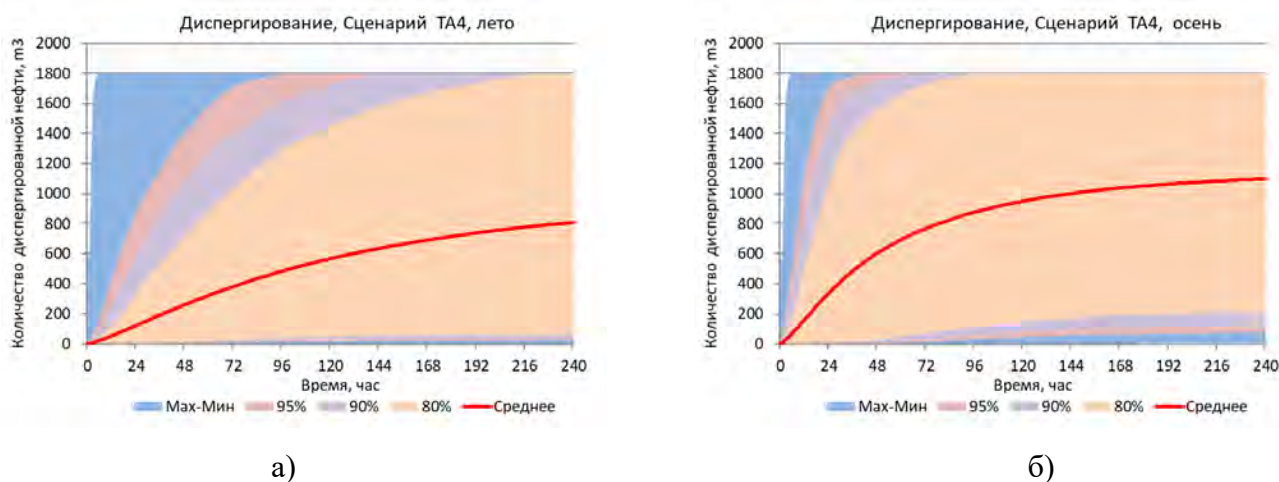


Рисунок 5.2. Статистика количества нефти на поверхности моря в Сценарии ТА4 в летний сезон (а) и осенний сезоны (б)

Из расчетов статистики выветривания судового топлива, представленных на Рисунке 5.2 следует, что в среднем за 10 суток с поверхности моря удаляется за счет диспергирования примерно 800 кубов судового топлива в летний период и немногим более 1000 м<sup>3</sup> в осенний. Как следует из сведений о топливе IFO-180, эмульсия типа вода в нефти может образовываться лишь в первые часы после сброса и содержание воды в эмульсии не превышает 26%. Статистические расчеты также показывают, что в районе могут быть штормовые ситуации, когда разлив 1800 м<sup>3</sup> судового топлива может превратиться в дисперсию нефть-в-воде за несколько часов после сброса.

<sup>6</sup> Выветривание нефти – удаление с поверхности моря за счет процессов испарения и диспергирования

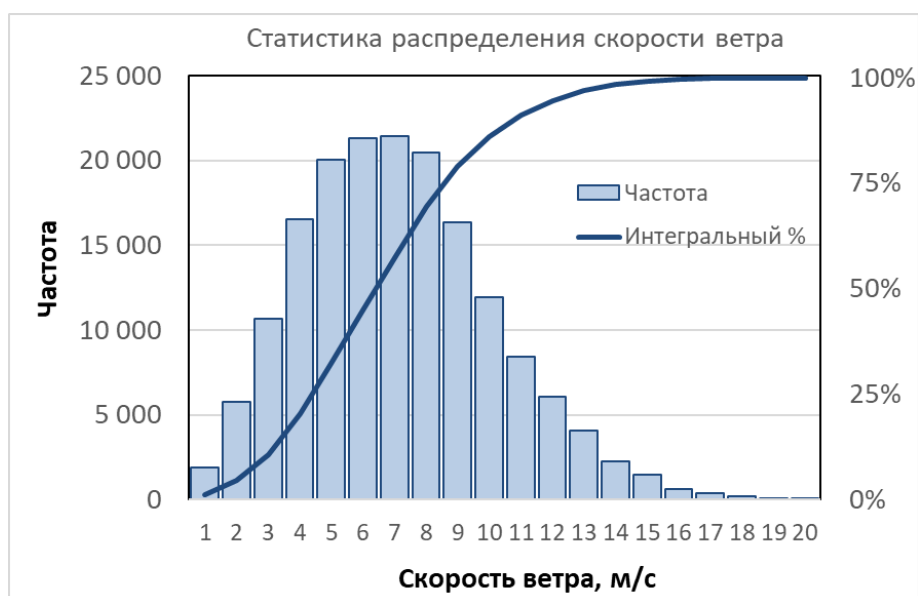


Рисунок 5.3. Статистика распределения скорости ветра по тематическому набору данных

## 5.2. Оценка геометрических размеров разливов

Нефть, перекачиваемая по подводному трубопроводу, как указано в разделе 2.2 имеет температуру застывания +18 - +22 градуса Цельсия (см. раздел 2. Температура Печорского моря даже летом не поднимается выше 10-12 градусов. Таким образом, попадая в морскую среду нефть будет довольно быстро остывать, образуя на поверхности куски/комки/лепешки, как показано на Рисунке 6.2. Распространение такой субстанции по поверхности воды будет определяться процессами турбулентной диффузии [Озмидов, 1986]

Оценка радиуса области диффундирующей примеси по [Осубо, 1971] определяется соотношением  $\sigma^2 [см^2] = 0.0108t^{2.34} [сек]$ , где  $\sigma^2$  - средний квадрат рассеяния диффундирующих частиц.

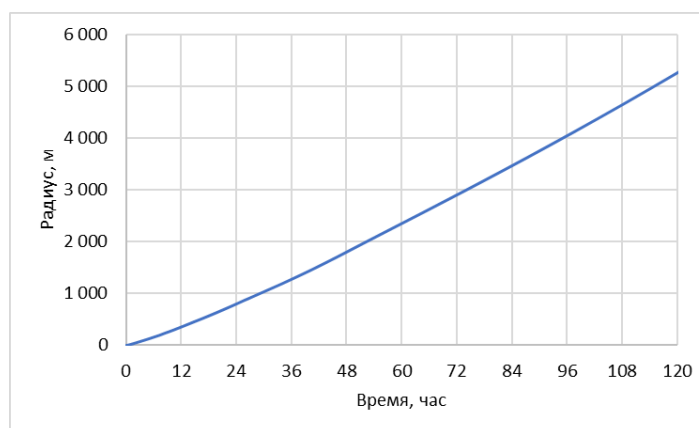


Рисунок 5.4. Радиус рассеяния диффундирующей примеси по [Осубо, 1971]

С учетом первого этапа – растекания еще не застывшей нефти – радиус области загрязнения будет несколько различаться для трех сценариев разливов.

### 5.2.1. Сценарий ТА1

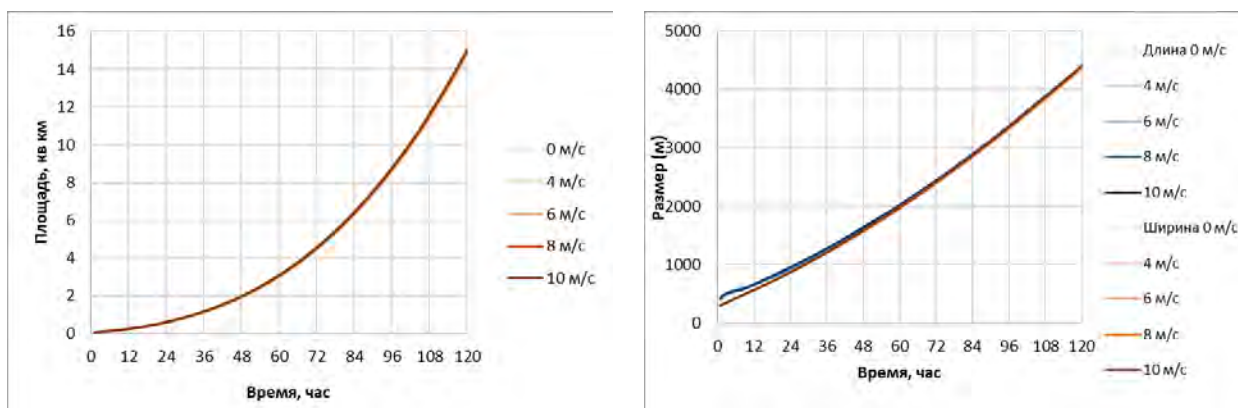


Рисунок 5.5. Изменение геометрических размеров области загрязнения при сценарии сброса ТА1

В зависимости от объема сброса в первые минуты (десятки минут) нефть будет растекаться по поверхности, затем застынет и начнет ломаться на отдельные куски, которые уже будут рассеиваться диффузией. Размеры области загрязнения нефтью и нефтепродуктами в результате турбулентной диффузии в меньшей степени зависят от объема сброса, чем в случае растекания ньютоновской жидкости.

### 5.2.2. Сценарий ТА2

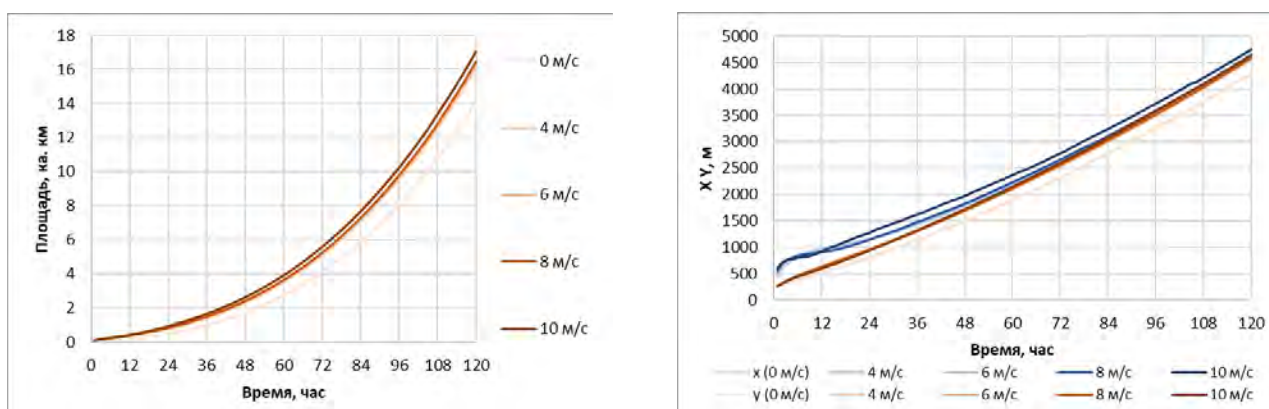


Рисунок 5.6. Изменение геометрических размеров области загрязнения при сценарии сброса ТА2

### 5.2.3. Сценарий ТА3

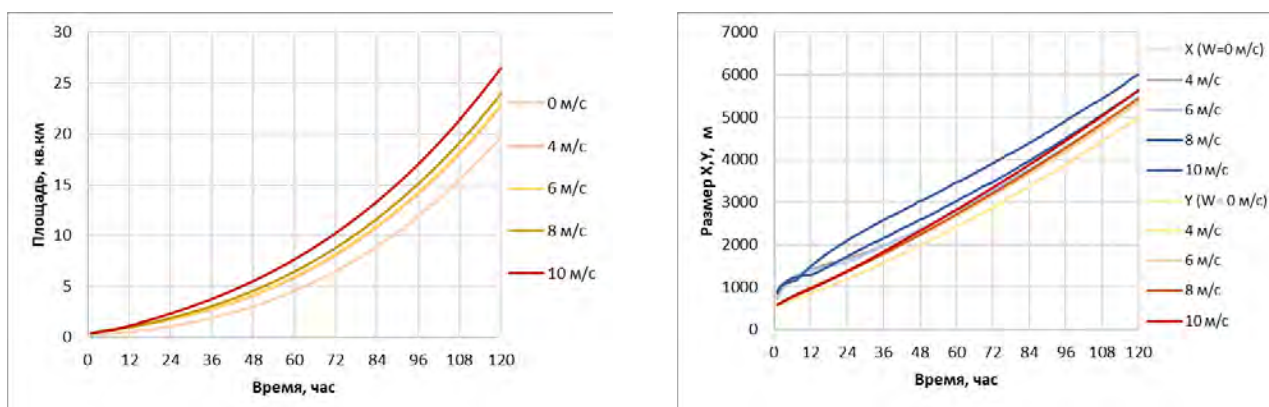


Рисунок 5.7. Изменение геометрических размеров области загрязнения при сценарии сброса ТАЗ

#### 5.2.4. Сценарий ТА4

Формирование пятна разлива мазута на поверхности моря будет определяться процессами растекания.

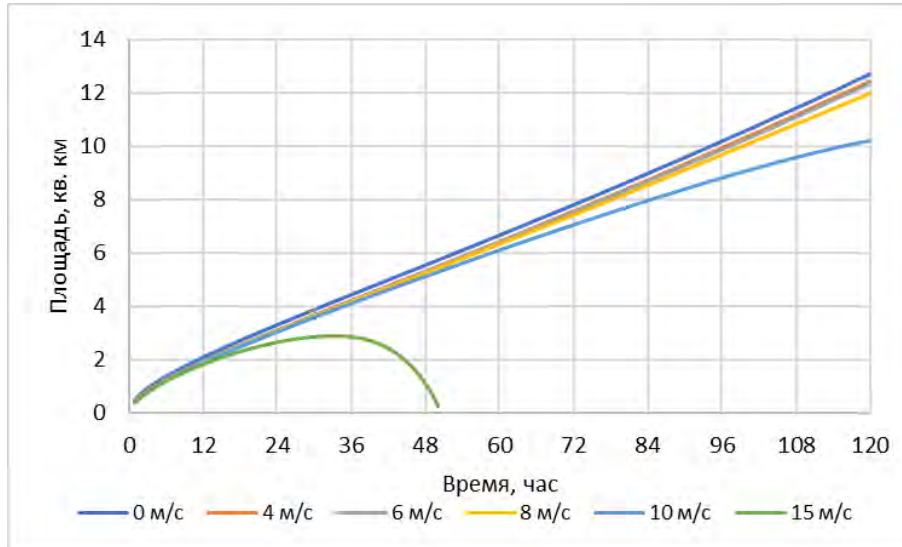


Рисунок 5.8. Изменение площади разлива судового топлива при сценарии сброса ТА4



Таблица 5.1 Расчетные значения количества (тонны) судового топлива на поверхности (ТП), испарившегося (ТИ) и диспергированного (ТД) и площади загрязнения (Пл)

Время, час	0 м/с				4 м/с				6 м/с			
	ТП, т	ТИ, т	ТД, т	Пл, КВ.КМ	ТП, т	ТИ, т	ТД, т	Пл, КВ.КМ	ТП, т	ТИ, т	ТД, т	Пл, КВ.КМ
6	1728	0	0	1.3	1728	0	0.0	1.2	1728	0	0	1.2
12	1728	0.01	0	2.0	1728	0.01	0.0	1.9	1728	0.01	0	1.9
18	1728	0.02	0	2.7	1728	0.02	0.0	2.5	1727	0.02	1	2.5
24	1728	0.03	0	3.3	1728	0.03	0.0	3.1	1726	0.04	2	3.1
30	1728	0.04	0	3.8	1728	0.04	0.1	3.6	1725	0.05	3	3.6
36	1728	0.05	0	4.4	1728	0.05	0.1	4.2	1723	0.07	5	4.2
42	1728	0.07	0	5.0	1728	0.07	0.1	4.7	1721	0.09	7	4.7
48	1728	0.09	0	5.5	1728	0.09	0.2	5.3	1719	0.12	9	5.3
54	1728	0.1	0	6.1	1728	0.11	0.3	5.8	1716	0.15	12	5.8
60	1728	0.13	0	6.6	1728	0.13	0.4	6.4	1713	0.18	15	6.4
66	1728	0.15	0	7.2	1727	0.15	0.5	7.0	1710	0.21	18	6.9
72	1728	0.17	0	7.8	1727	0.18	0.6	7.5	1706	0.24	22	7.5
78	1728	0.2	0	8.4	1727	0.21	0.8	8.1	1702	0.28	26	8.1
84	1728	0.23	0	9.0	1727	0.24	1.0	8.7	1698	0.32	30	8.7
90	1728	0.26	0	9.5	1727	0.27	1.3	9.3	1694	0.37	34	9.3
96	1728	0.29	0	10.2	1726	0.3	1.5	9.9	1689	0.41	39	9.9
102	1728	0.33	0	10.8	1726	0.34	1.8	10.5	1684	0.46	43	10.5
108	1728	0.37	0	11.4	1726	0.38	2.2	11.1	1679	0.52	49	11.1
114	1728	0.41	0	12.0	1725	0.42	2.5	11.8	1673	0.57	54	11.7
120	1728	0.45	0	12.7	1725	0.46	2.9	12.4	1668	0.63	59.8	12.3

Таблица 5.2 Расчетные значения количества (тонны) судового топлива на поверхности (ТП), испарившегося (ТИ) и диспергированного (ТД) и площади загрязнения (Пл)

Время, час	8 м/с				10 м/с				15 м/с			
	ТП, т	ТИ, т	ТД, т	Пл, КВ.КМ	ТП, т	ТИ, т	ТД, т	Пл, КВ.КМ	ТП, т	ТИ, т	ТД, т	Пл, КВ.КМ
6	1727	0	1	1.2	1718	0.01	10	1.2	1588	0.01	140	1.2
12	1722	0.01	6	1.9	1698	0.02	30	1.9	1350	0.02	378	1.8
18	1716	0.03	12	2.5	1670	0.03	58	2.5	1060	0.04	668	2.3
24	1707	0.04	21	3.1	1635	0.05	93	3.0	757	0.07	971	2.6

30	1697	0.07	31	3.6	1594	0.08	134	3.6	470	0.09	1258	2.8
36	1685	0.09	43	4.2	1548	0.1	180	4.1	233	0.12	1495	2.8
42	1671	0.12	57	4.7	1497	0.14	231	4.6	74	0.15	1654	2.4
48	1656	0.15	72	5.2	1442	0.17	286	5.1	5	0.17	1723	1.1
54	1639	0.18	89	5.8	1383	0.21	345	5.6				
60	1621	0.22	106	6.3	1320	0.25	407	6.1				
66	1602	0.26	126	6.9	1255	0.3	473	6.6				
72	1582	0.3	146	7.4	1186	0.35	542	7.0				
78	1560	0.35	168	8.0	1115	0.4	613	7.5				
84	1537	0.4	191	8.5	1043	0.46	685	8.0				
90	1512	0.45	215	9.1	969	0.51	758	8.4				
96	1487	0.51	241	9.7	895	0.58	833	8.8				
102	1460	0.57	267	10.3	820	0.64	908	9.2				
108	1433	0.63	295	10.8	744	0.7	983	9.6				
114	1404	0.7	324	11.4	670	0.77	1058	9.9				
120	1374	0.77	354	12.0	596	0.84	1131	10.2				

Обратим внимание, что судовое топливо практически не испаряется, однако при больших скоростях ветра может полностью диспергировать с морской поверхности в водную толщу.

### 5.3. Оценка вероятности достижения разливом нефти береговой зоны

Оценка вероятности достижения разливом нефти береговой зоны проводится путем обработки ансамбля траекторий распространения разливов от точки на акватории, где возможен аварийный сброс ЗВ. Значение вероятности поражения берега зависит от удаленности точки потенциального сброса от береговой черты, гидрометеорологических условий и, что очень важно, длительности сброса нефти. При продолжительном сбросе область нефтяного загрязнения фактически растет пропорционально скорости течения и, таким образом, протяженный разлив можно рассматривать как суперпозицию точечных источников. Вероятность достижения какой-либо частью протяженного разлива береговой зоны, как правило, выше, чем в случае залпового выброса нефти. Консервативные оценки вероятности достижения береговой зоны проводятся без учета выветривания нефти. Консервативность оценок означает, что приведенные значения вероятности достижения берега являются предельными к разным масштабам сброса нефти.

В зимний период вдоль некоторых участков побережья Печорского моря может сформироваться припай, как показано на Рисунке 5.3, главным образом в заливах и устьях рек.

При наличии припая побережье защищено искусственным ледовым барьером. Однако припай время от времени взламывается за счет прилива и ветровых условий и таким образом участки побережья оказываются уязвимыми разливами нефти даже в зимний период.

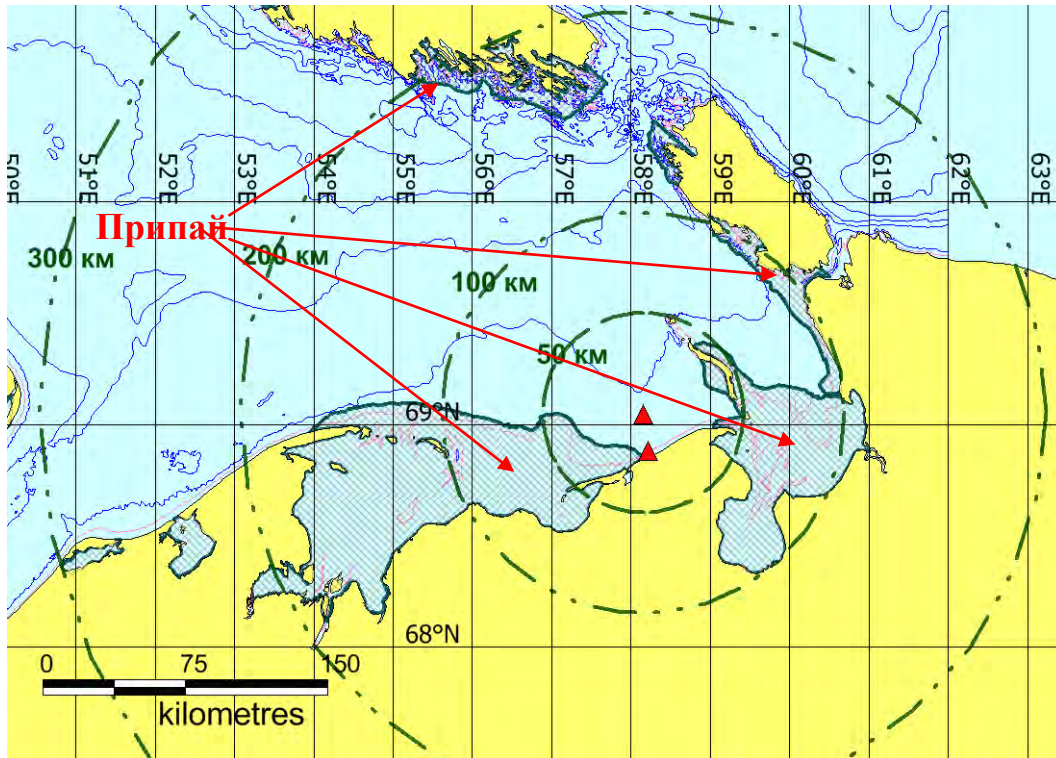
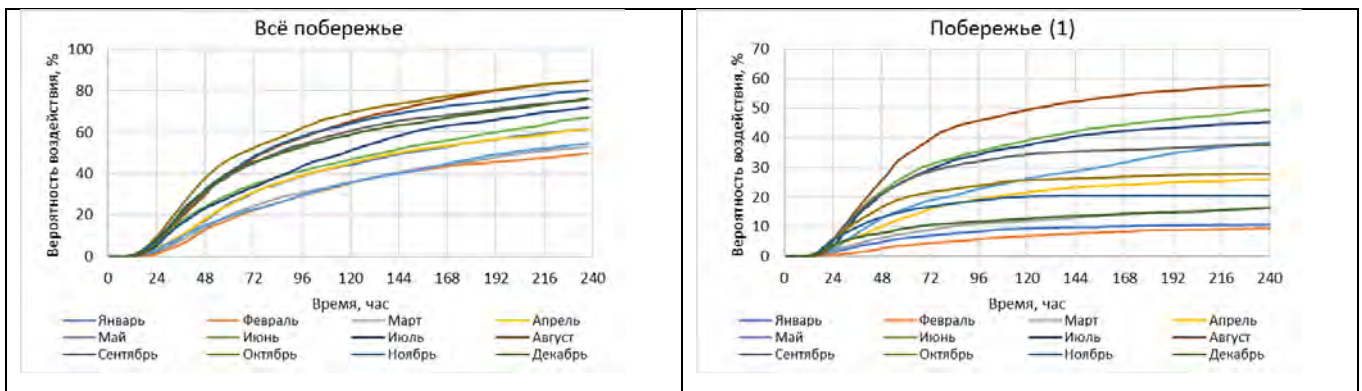


Рисунок 5.9. Среднегодовое положение припайного льда в Печорском море.

Непостоянное присутствие припайного льда, в том числе на побережье полуострова Варандей несколько затрудняет интерпретацию расчета вероятности воздействия на побережье в зимний период. По этой причине результаты риск-анализа распространения разливов в зимний период, представленные на картах в Разделе 5.4, показаны на фоне припая, имея в виду, что в моменты его взлома, нефтяной разлив в условиях дрейфующих льдов небольшой сплоченности может выноситься на побережье.

Тоже относится и к оценке вероятности воздействия на побережье по месяцам года. Имея в виду, что в рассмотренный период 1995-2014 годов имели место и мягкие и суровые зимы. На рисунках 5.10 – 5.13 обозначения Побережье (1-5) подразумевает воздействия на участки берега, относящиеся к ООПТ, сгруппированных, как показано на Рисунке 2.6.

### 5.3.1. Сценарий ТА 1



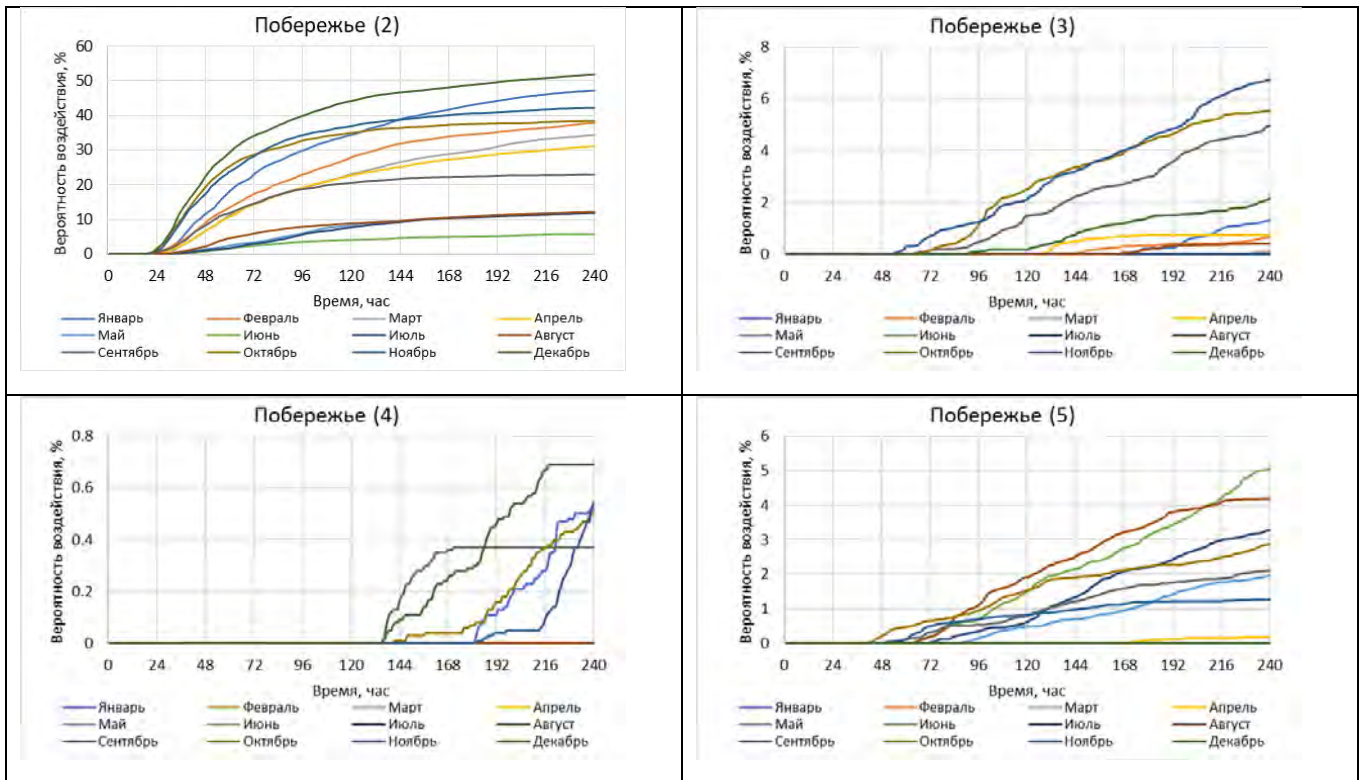


Рисунок 5.10. Вероятность достижения разливом нефти и нефтепродуктов участков побережья при сценарии ТА 1

### 5.3.2. Сценарий ТА 2

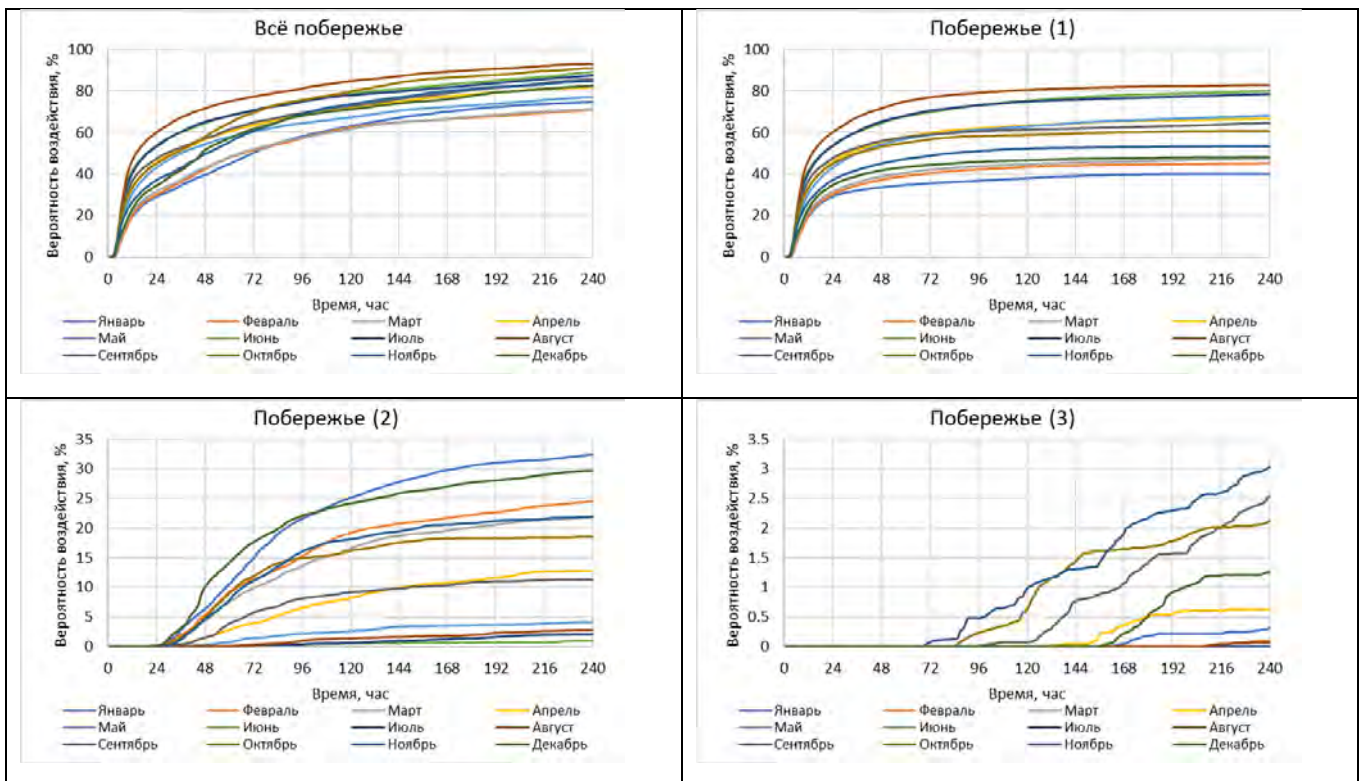


Рисунок 5.11. Вероятность достижения разливом нефти и нефтепродуктов участков побережья при сценарии ТА 2

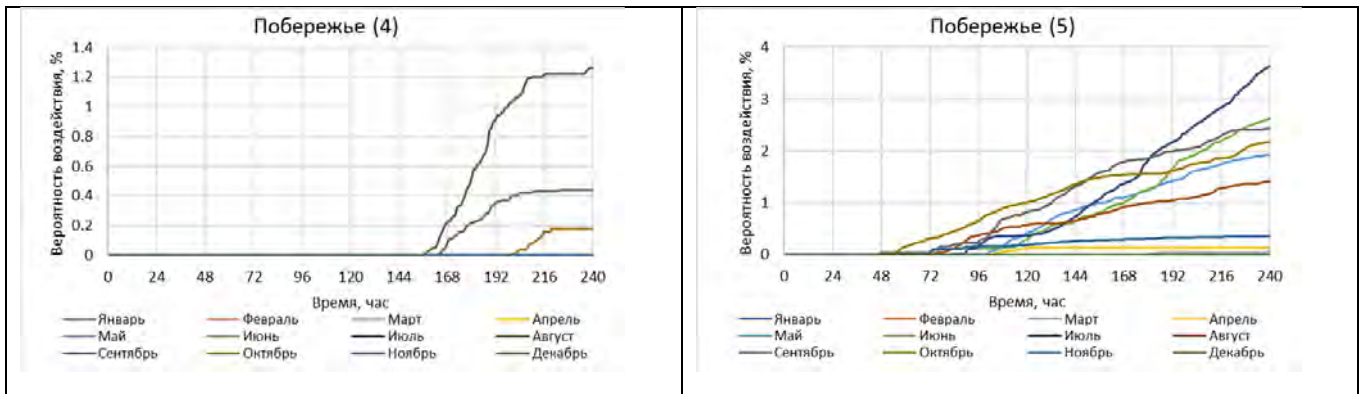


Рисунок 5.11. Вероятность достижения разливом нефти и нефтепродуктов участков побережья при сценарии ТА 2

### 5.3.3. Сценарий ТА 3

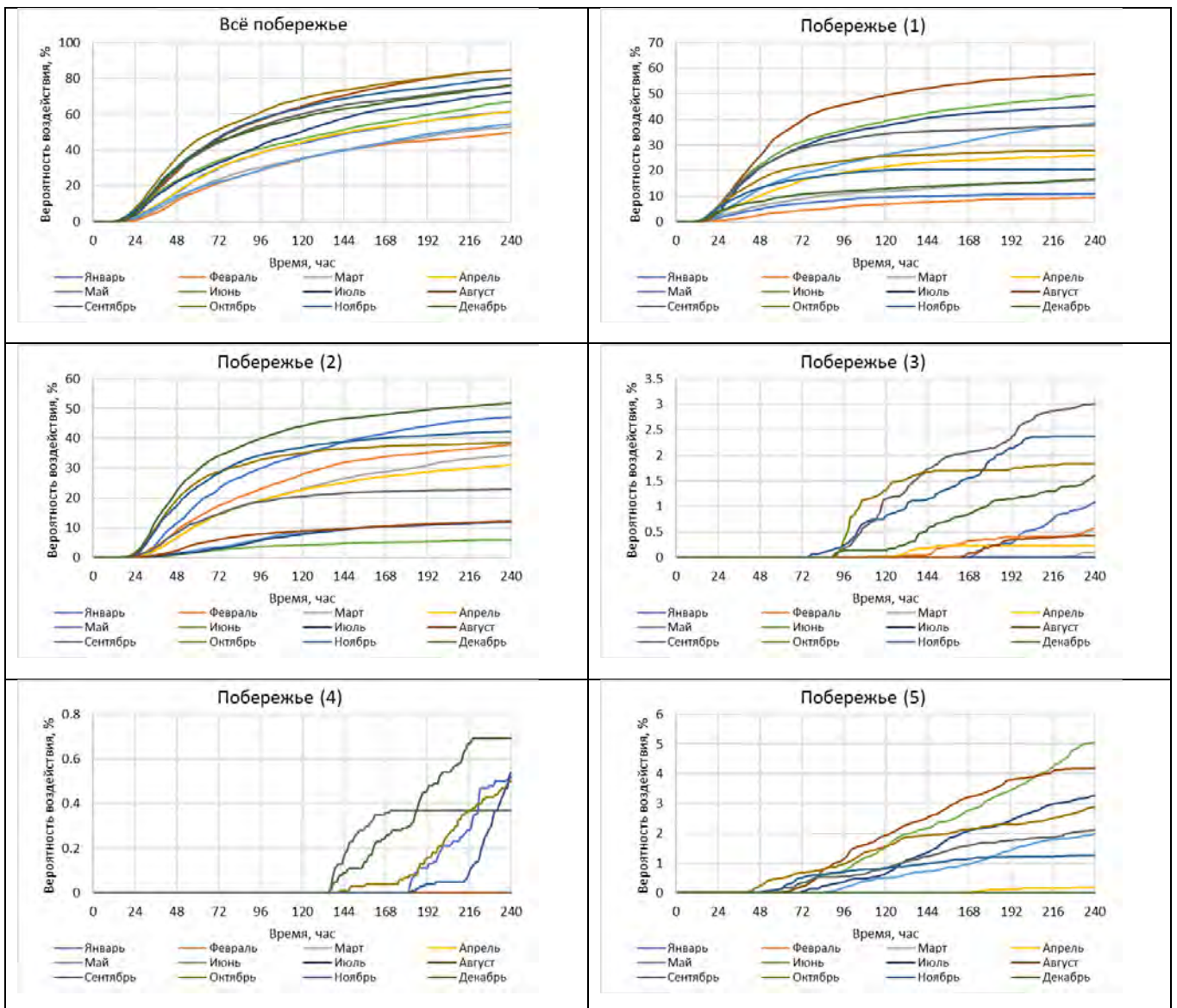


Рисунок 5.12. Вероятность достижения разливом нефти и нефтепродуктов участков побережья при сценарии ТА 3

## 5.3.4. Сценарий ТА 4

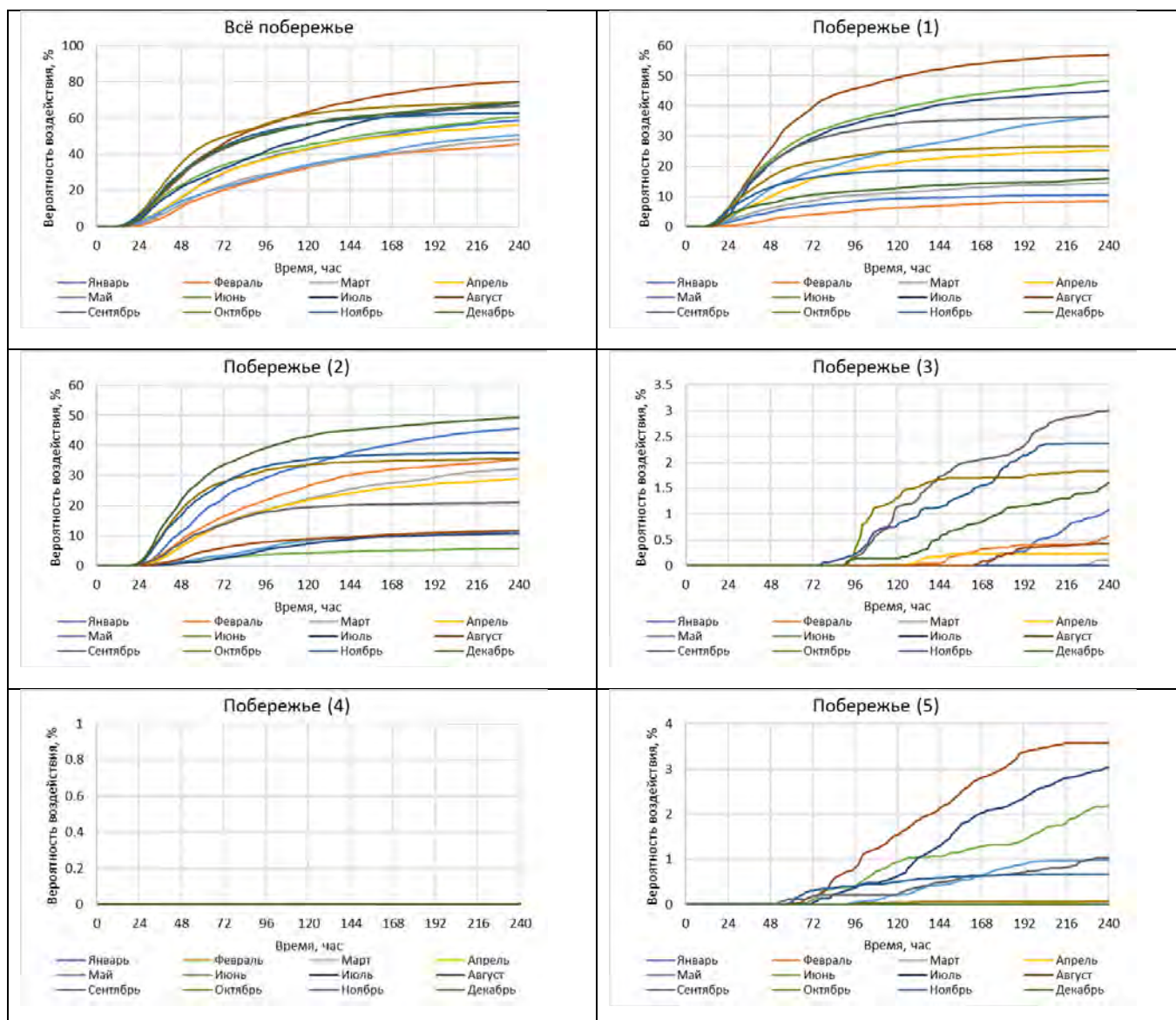


Рисунок 5.13. Вероятность достижения разливом нефти и нефтепродуктов участков побережья при сценарии ТА 4

## 5.4. Примеры расчета отдельных сценариев распространения разливов (РР)

**Сценарий распространения аварийного разлива нефти** – расчет последовательных положения и конфигурации разлива, обусловленных переносом и деформацией пятна нефти на поверхности моря за счет совокупного действия ветра и течений, оценка изменения геометрических (площадь, толщина, линейные размеры) и физико-химических характеристик разлива нефти, таких как плотность и вязкость, меняющихся в результате выветривания нефти, оценка количества испарившейся нефти и диспергированной в водную толщу.

На ниже следующих Рисунках цифрами рядом с конфигурацией нефтяного загрязнения показано соответствующее время после разлива.

### 5.4.1. Пример распространения разлива нефти из трубопровода (ТА1) по метеорологическому сценарию M4239\_20

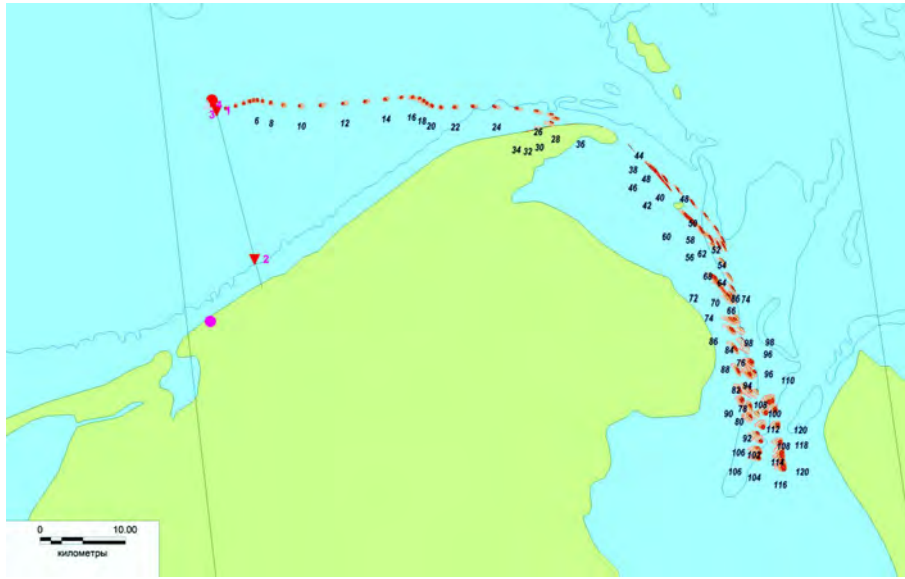
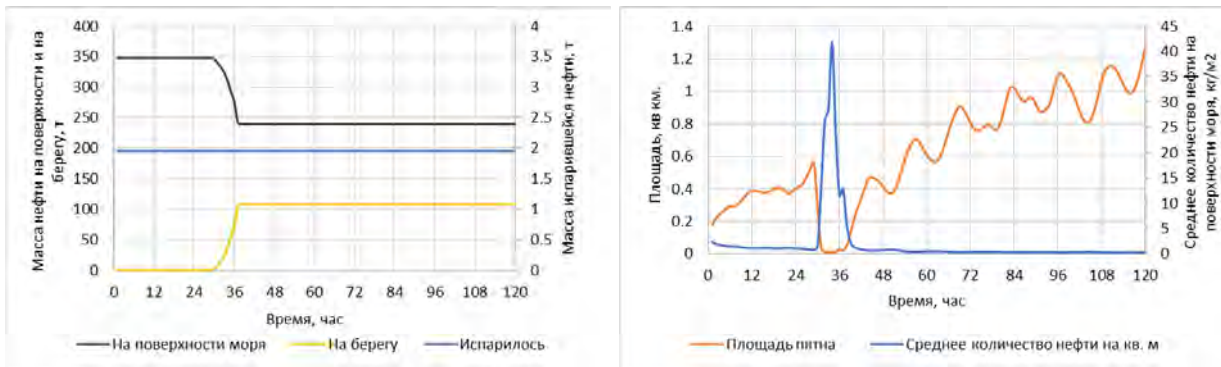


Рисунок 5.14. Последовательные положения области нефтяного загрязнения в сценарии M4239\_20



а)

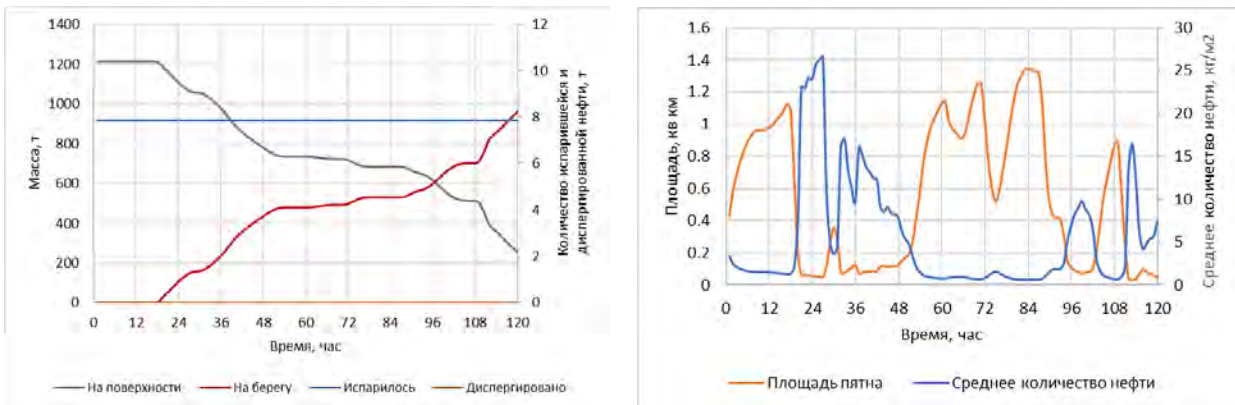
б)

Рисунок 5.15. Баланс массы в разливе нефти из трубопровода по сценарию M4239\_20 (а) и изменение среднего количества нефти на  $\text{м}^2$  поверхности (б)

**5.4.2. Пример распространения разлива нефти из трубопровода (ТА2) по метеорологическому сценарию М4736\_20**



Рисунок 5.16. Последовательные положения области нефтяного загрязнения в сценарии М4736\_20



а)

б)

Рисунок 5.17. Баланс массы в разливе нефти из трубопровода по сценарию М4736\_20 (а) и изменение среднего количества нефти на  $m^2$  поверхности (б)



### 5.4.3. Пример распространения разлива нефти из танкера (ТАЗ) по метеорологическому сценарию М6116\_19<sup>7</sup>

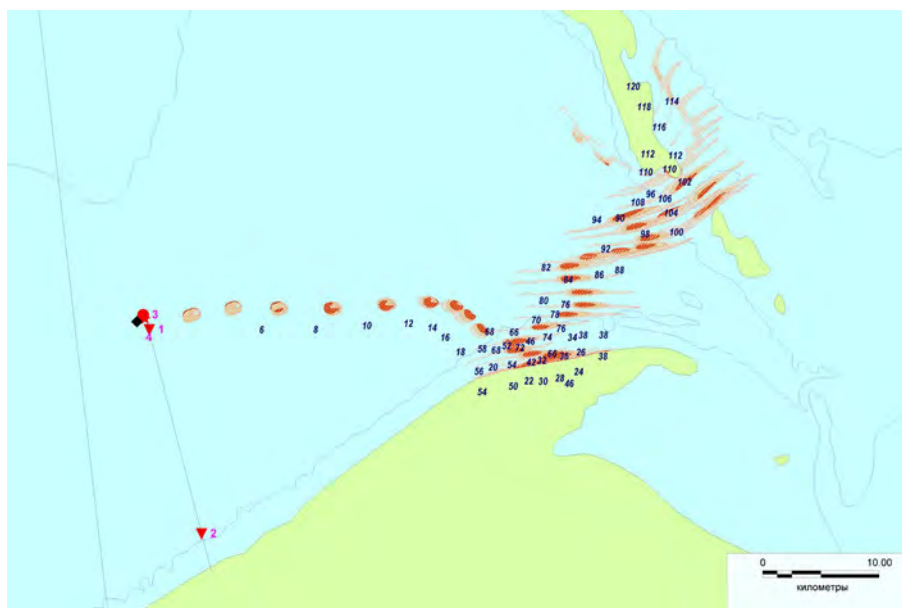


Рисунок 5.18. Последовательные положения области нефтяного загрязнения в сценарии М6116\_19

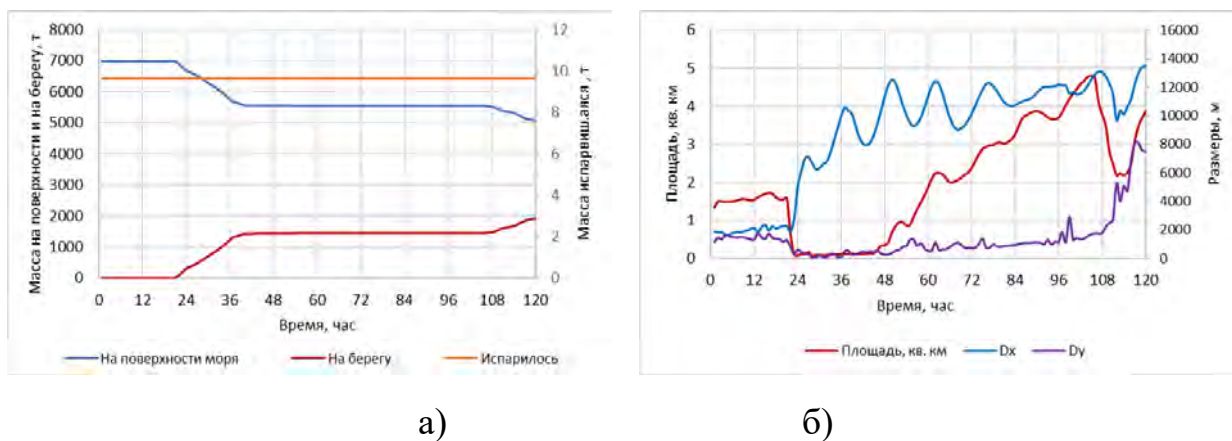


Рисунок 5.19. Баланс массы в разливе нефти из танкера по сценарию М6166\_19 (а) и изменение размеров пятна (б)

<sup>7</sup> Мнемоника названия сценариев распространения нефти: М6116\_19: М — метеорологический, 6116 — количество часов от начала года до начала сброса нефти, \_19 — сценарий из девятнадцатого по порядку года реконструкции гидрометеорологических условий (1995 -2014 гг.)

#### 5.4.4. Примеры разлива судового топлива (ТА4)

##### 5.4.4.1. Сценарий распространения разлива судового топлива по метеорологическому сценарию М6116\_19 (12.09.2013, 20 часов)

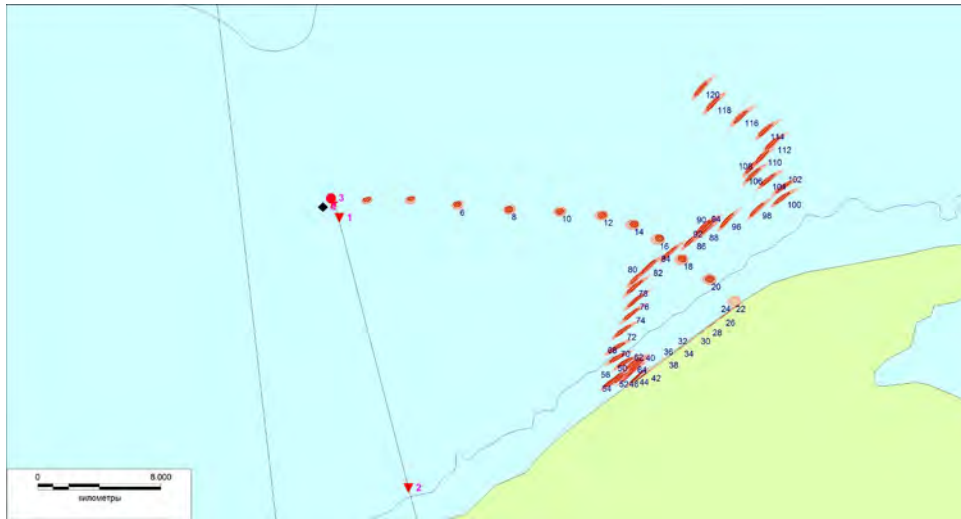


Рисунок 5.20. Последовательные положения пятна судового топлива в сценарии М6116\_19

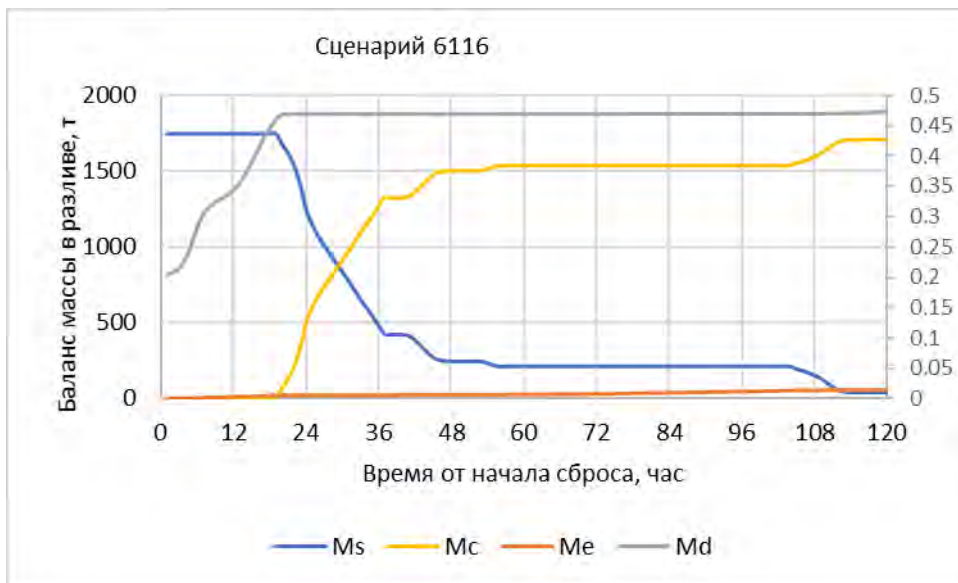


Рисунок 5.21. Баланс массы в сценарии распространения судового топлива М6116\_19

#### 5.4.4.2. Сценарий распространения разлива судового топлива по метеорологическому сценарию M6537\_19 (30.09.2013, 9 часов)



Рисунок 5.22. Последовательные положения пятна судового топлива в сценарии M6537\_19

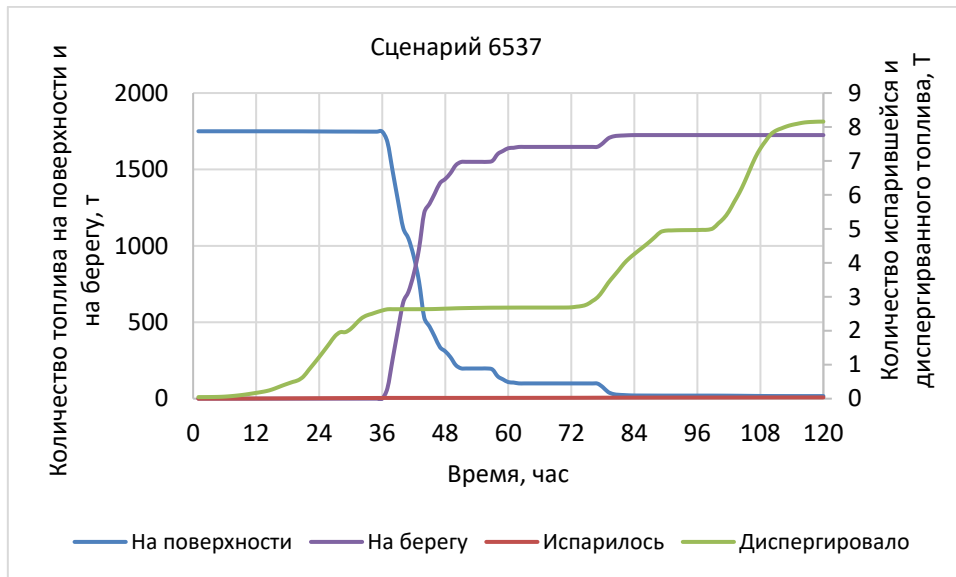


Рисунок 5.23. Баланс массы в сценарии распространения судового топлива M6537\_19

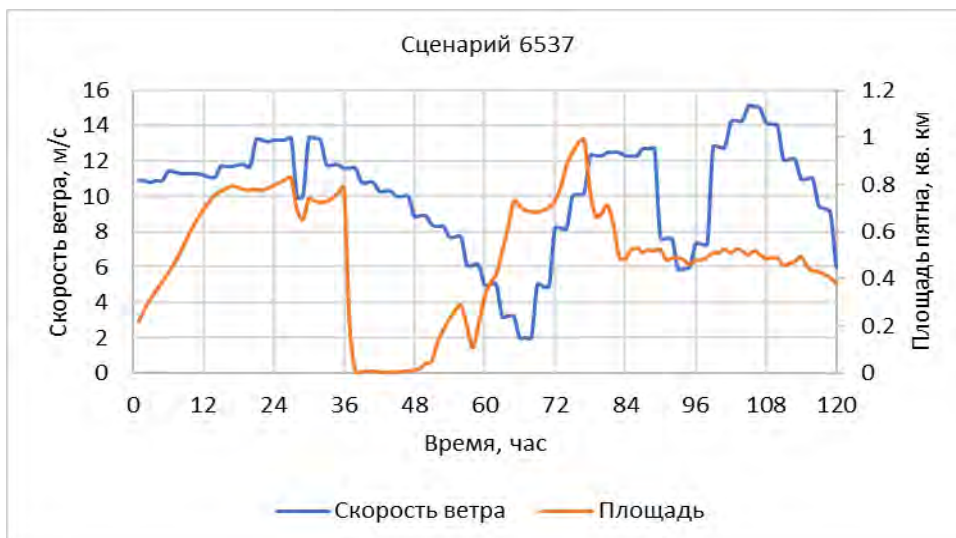


Рисунок 5.24. Изменение скорости ветра и размеров пятна судового топлива по Сценарию 6537

5.4.4.3. **Сценарий распространения разлива судового топлива по метеорологическому сценарию M6807\_19 (11.10.2013, 15 часов)**



Рисунок 5.25. Последовательные положения пятна судового топлива в сценарии M6537\_19

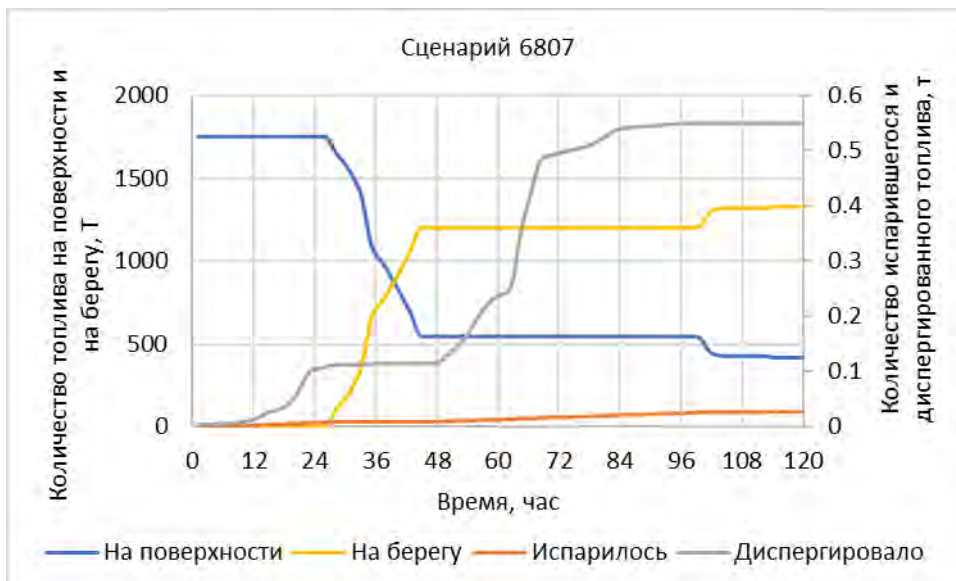


Рисунок 5.26. Баланс массы в сценарии распространения судового топлива M6537\_19

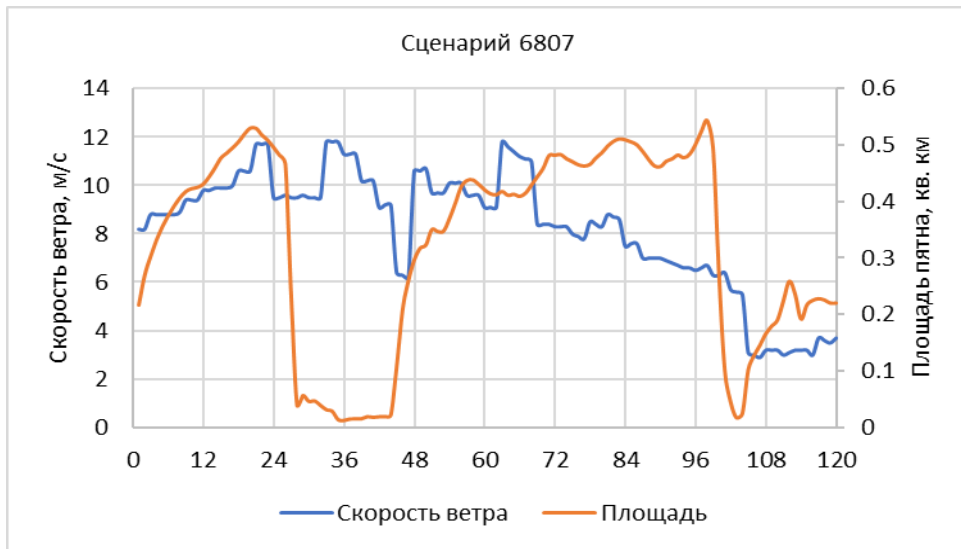


Рисунок 5.27. Изменение скорости ветра и размеров пятна судового топлива по Сценарию M6537\_19

#### 5.4.4.4. Разлив судового топлива в зимних условиях (10 февраля 1995 года)

Разлив судового топлива через 5 суток после распространения в поле дрейфующего льда в течение суток разрушился сильным волнением и практически исчез с поверхности воды в период образования разреженного льда.

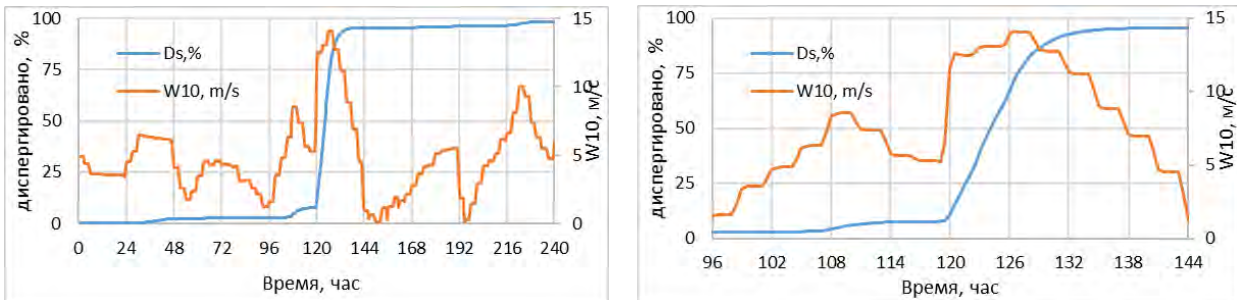


Рисунок 5.28. Изменение скорости ветра и количества диспергированного топлива в Сценарии M960\_1 (10.02.1995)

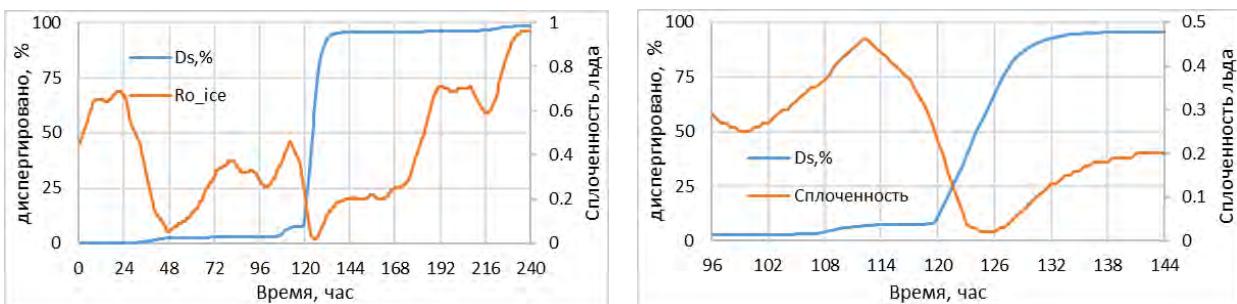


Рисунок 5.29. Изменение сплоченности льда и количества диспергированного топлива в Сценарии M960\_1 (10.02.1995)

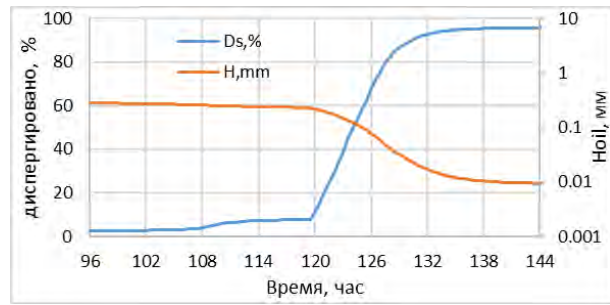
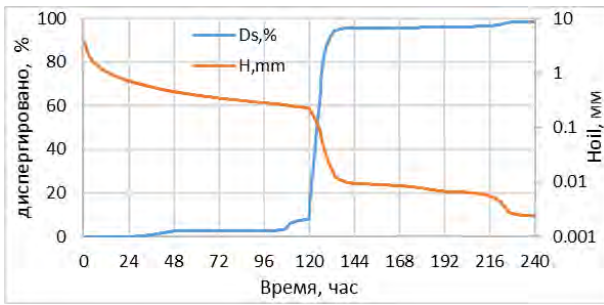


Рисунок 5.14. Изменение средней толщины слоя нефтепродукта и количества диспергированного топлива в Сценарии M960\_1 (10.02.1995)

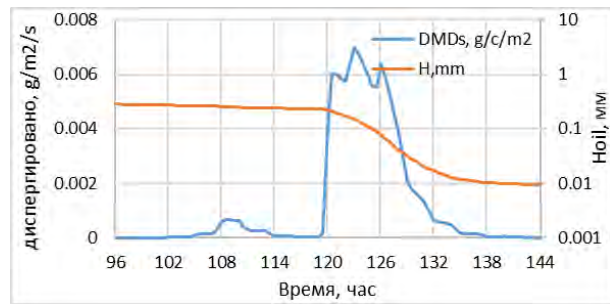
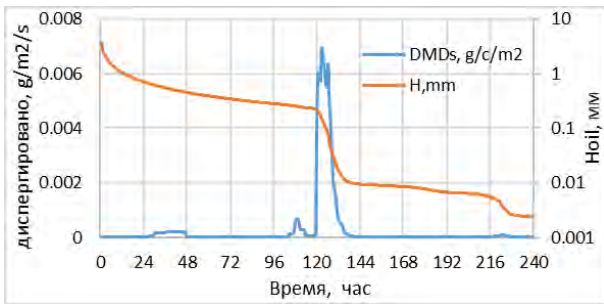


Рисунок 5.14. Изменение средней толщины слоя нефтепродукта и потока диспергированного топлива в Сценарии M960\_1 (10.02.1995)

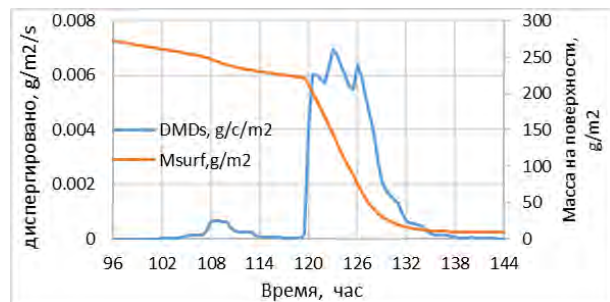
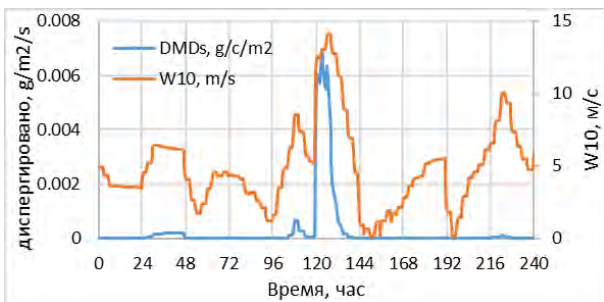


Рисунок 5.14. Изменение скорости ветра и потока диспергированного топлива в Сценарии 960\_1 (10.02.1995)

## 5.5. Результаты риск-анализа распространения нефти

Моделирование распространения разливов нефти при возможных аварийных сбросах в месте загрузки танкера-челнока при эксплуатации СМЛЮП в Печорском море было проведено на базе реконструкции гидрометеорологических условий за 20-летний период (1995-2014 годы). Для целей риск-анализа распространения разливов нефти было промоделировано по 8496 сценариев распространения нефти в каждом году, итого рассмотрено 169920 сценариев.

В рамках анализа риска распространения разливов было проведено:

- определение зон риска распространения разливов для различных моментов времени с момента аварии, понимая под зонами риска акватории, за пределы которых разлив не выходит ни при одной из возможных гидрометеорологических ситуаций;
- расчёт вероятности поражения районов ООПТ на акватории и побережье в зависимости от времени, прошедшего с момента аварии;

- расчет статистики естественного выветривания нефти из разлива в виде графиков максимального и минимального выветривания в зависимости от времени, прошедшего с момента аварии;
- определение сценариев распространения углеводородов, приводящих к поражению ООПТ и заданных участков береговых линий.

Исходя из ретроспективного анализа ледовых условий за 1979-2009 годы были определены средние границы периода открытой воды.

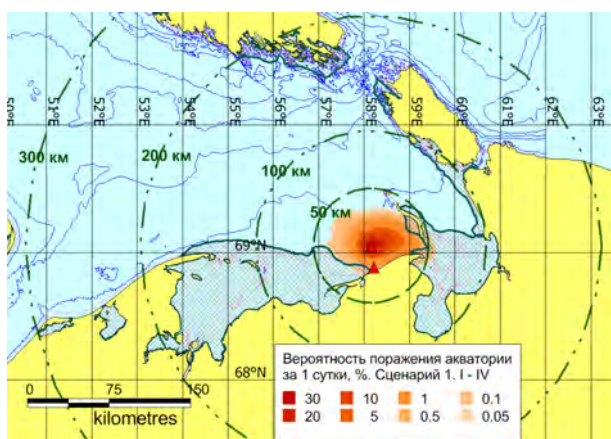
<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>

Анализ изменчивости ледовых условий в окрестности СМЛОП в Печорском море показал, что сроки появления и исчезновения льда могут меняться от года к году в диапазоне вариаций до одного месяца, а времена сохранения тяжелых ледовых условий (со сплоченностью свыше 8 баллов) в еще большем диапазоне.

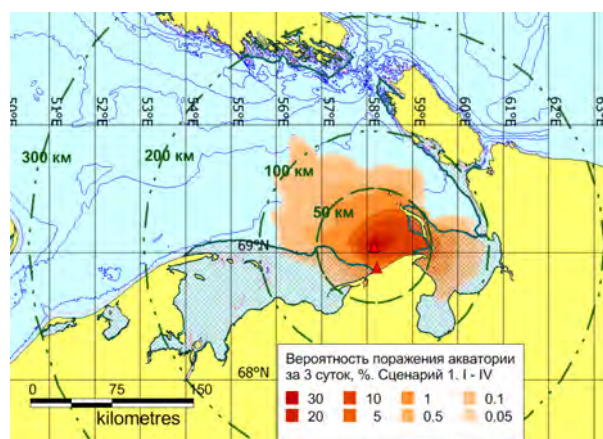
Результаты расчетов распространения разливов были обработаны в соответствии с методологией анализа риска распространения разливов [Зацева и др., 2014], ранее опробованной на ряде нефтегазовых проектов в арктических и других морских бассейнах Российской Федерации.

На Рисунках 5.26- 5.61 показаны области, внутри которых возможно воздействие разлива нефти на экосистемные элементы. Различными цветами, в соответствии с легендой, представленной на каждом из рисунков, показаны области, внутри которых вероятность воздействия меняется от 30% до исчезающе малых величин в 0.05%. Вероятность воздействия рассчитывалась при условии, что толщина пленки нефти на поверхности более 10 мкм. Вероятность воздействия в 100% имеет место лишь в небольшой области в районе источника

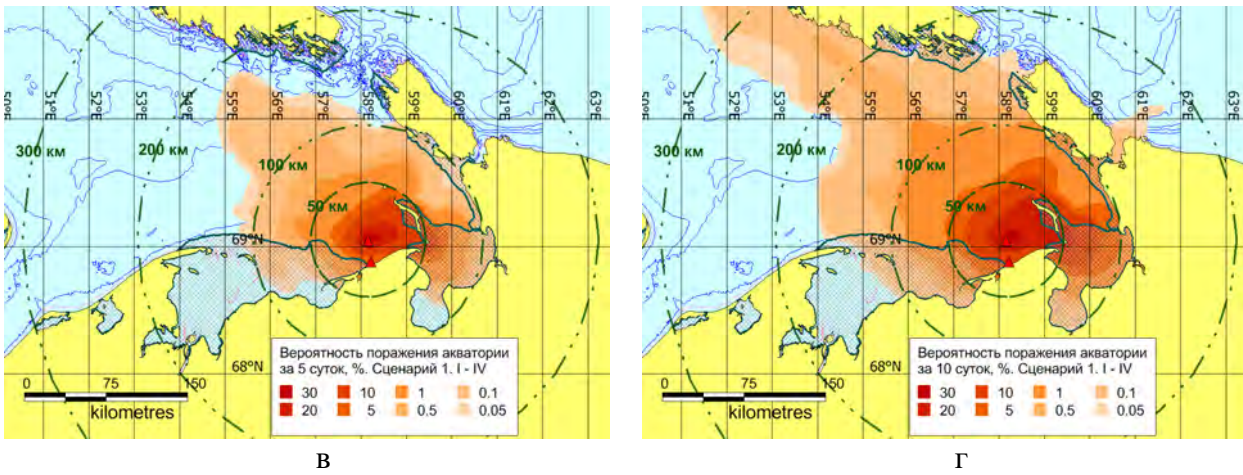
### 5.5.1. Зоны риска распространения нефти, Вероятности воздействия на акваторию и побережье. Сценарий 1



а



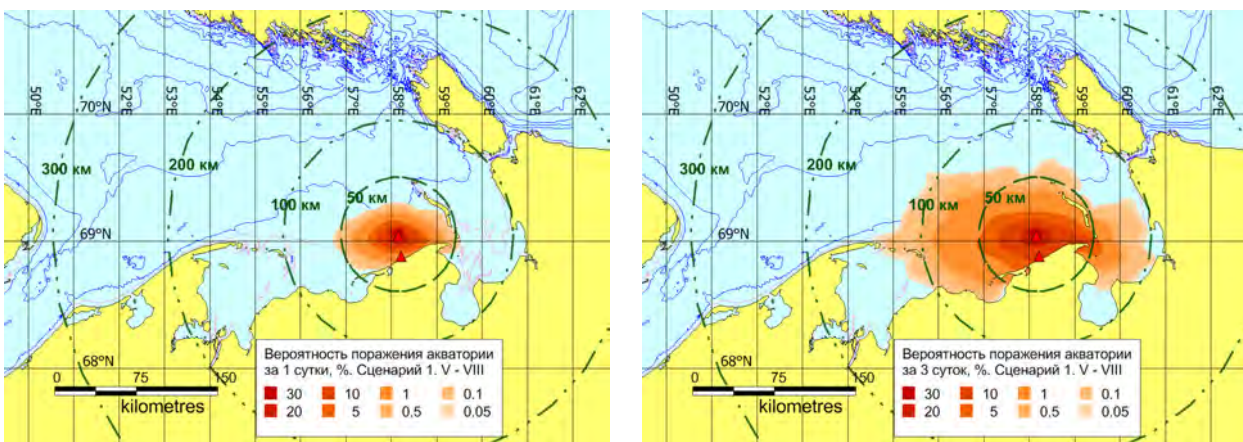
б



В

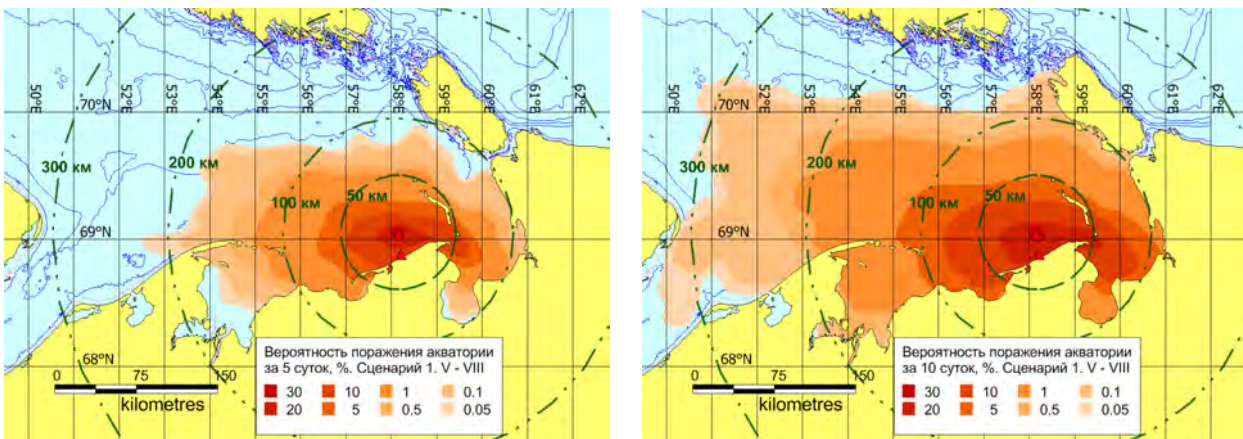
Г

Рисунок 5.30. Вероятность воздействия на акваторию в зимний сезон (I-IV). Сценарий 1, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



а

б



В

Г

Рисунок 5.31. Вероятность воздействия на акваторию летом (V-VIII). Сценарий 1, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



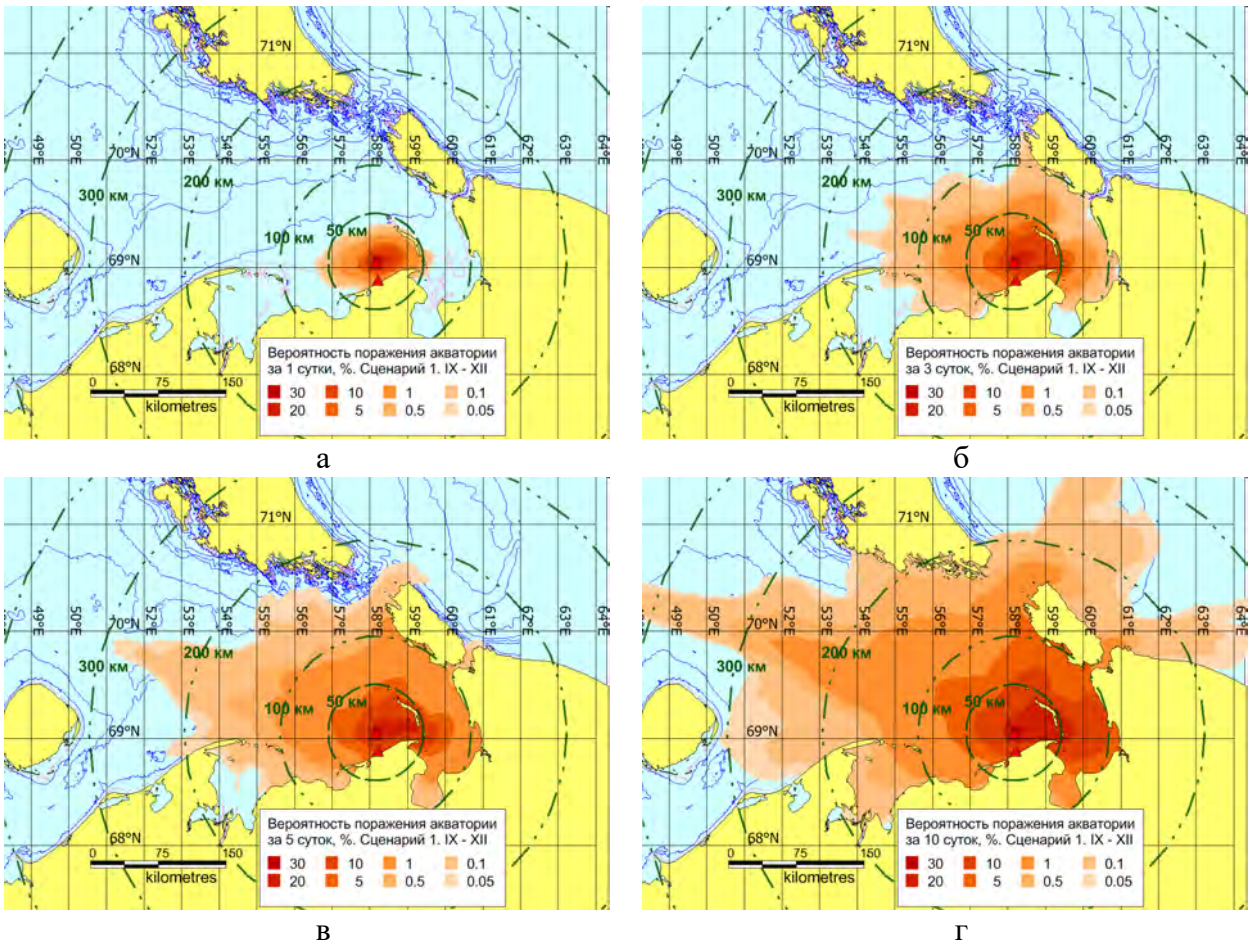


Рисунок 5.32. Вероятность воздействия на акваторию осенью (IX-XII). Сценарий 1, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток

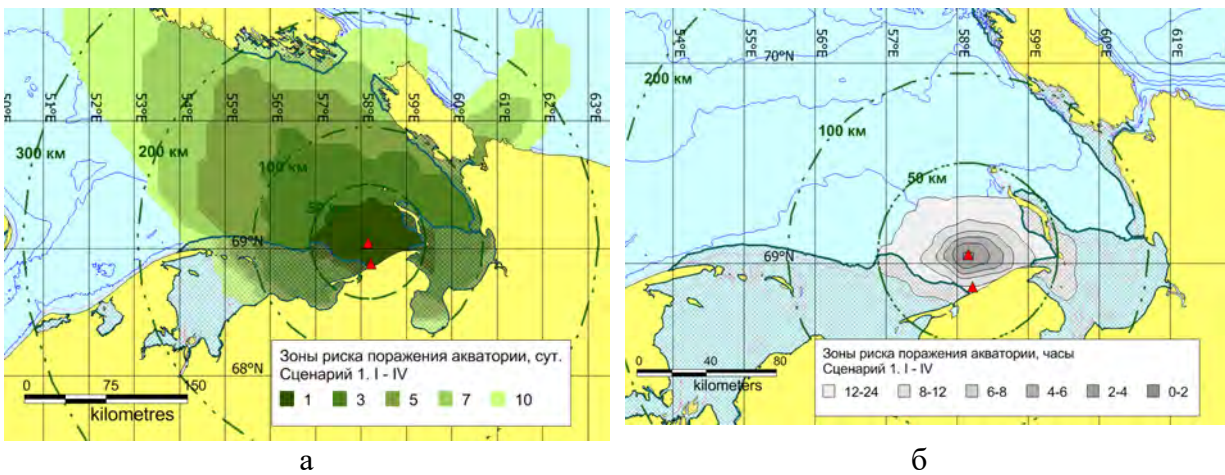
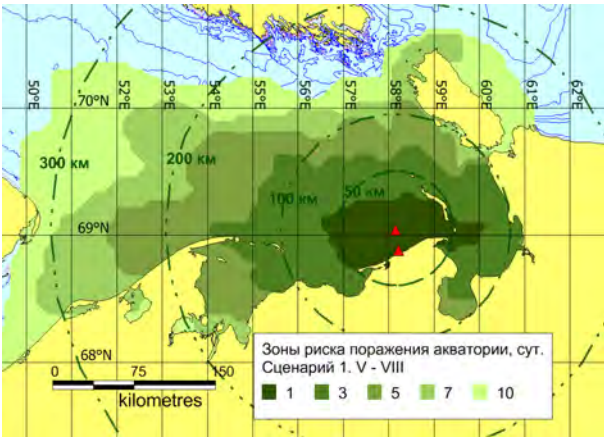
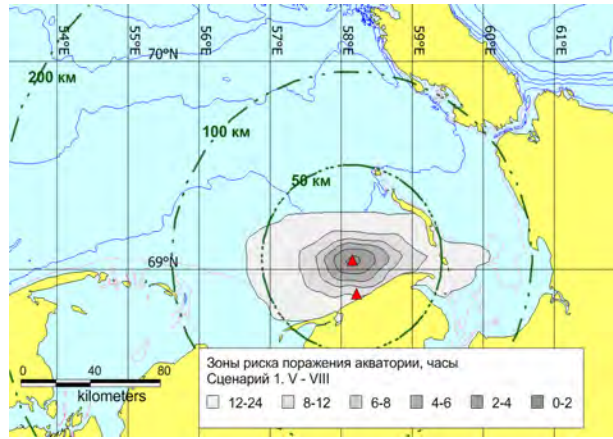


Рисунок 5.33. Зоны риска распространения нефти в зимний сезон (I-IV). Сценарий 1. а – зоны риска распространения нефти (сутки), б – зоны риска распространения нефти (часы)

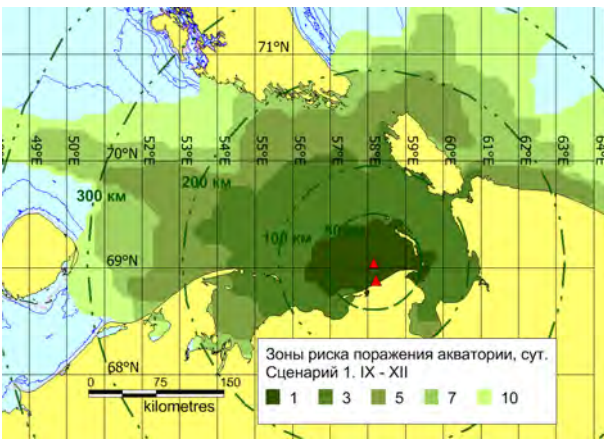


а

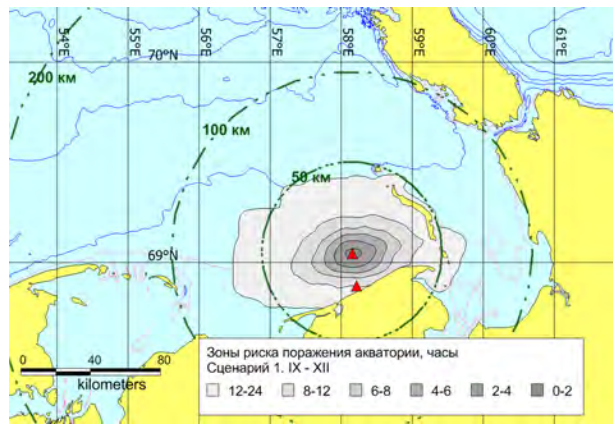


б

Рисунок 5.34. Зоны риска распространения нефти летом (V-VIII). Сценарий 1. а – зоны риска распространения нефти (сутки), б – зоны риска распространения нефти (часы)

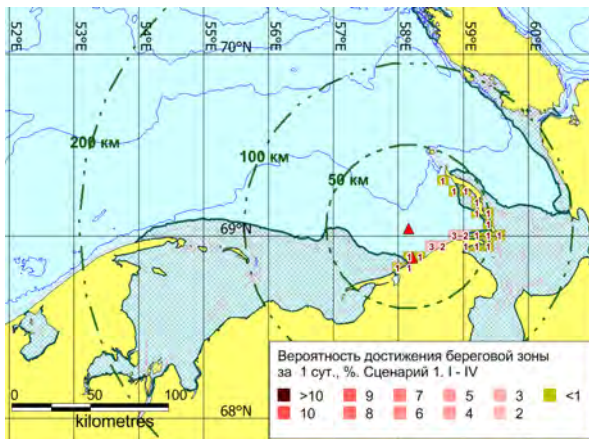


а

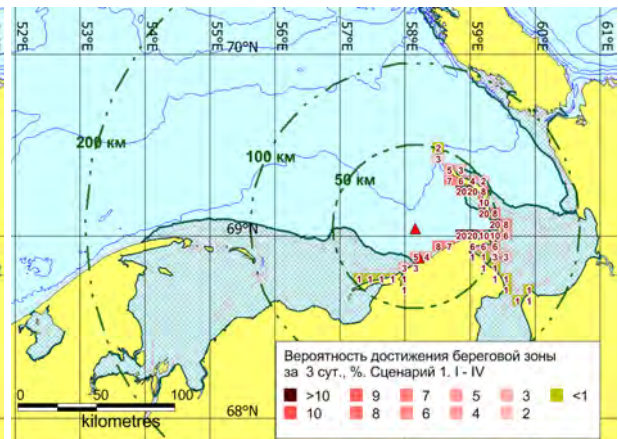


б

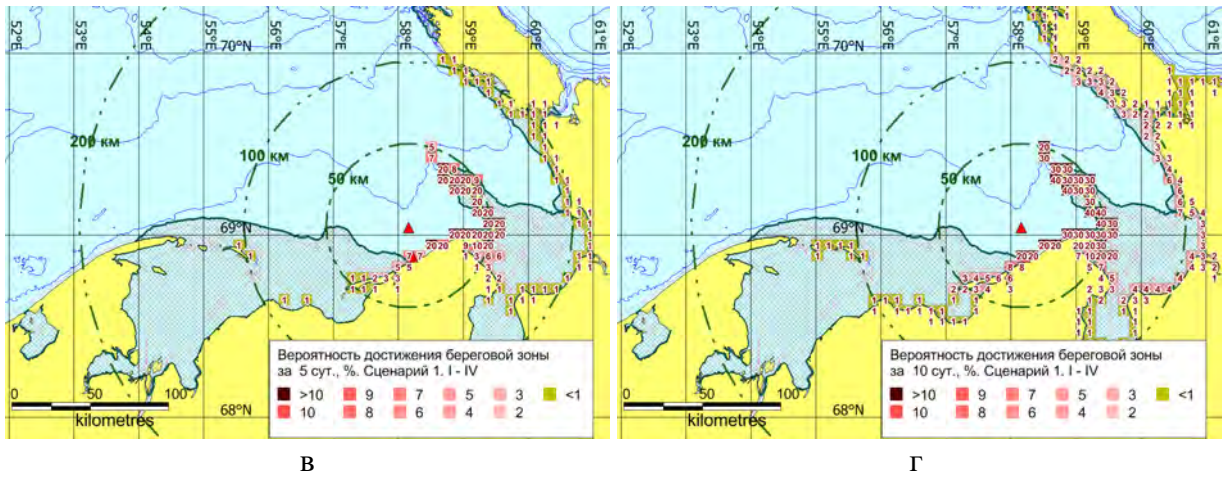
Рисунок 5.35. Зоны риска распространения нефти осенью (IX-XII). Сценарий 1. а – зоны риска распространения нефти (сутки), б – зоны риска распространения нефти (часы)



а



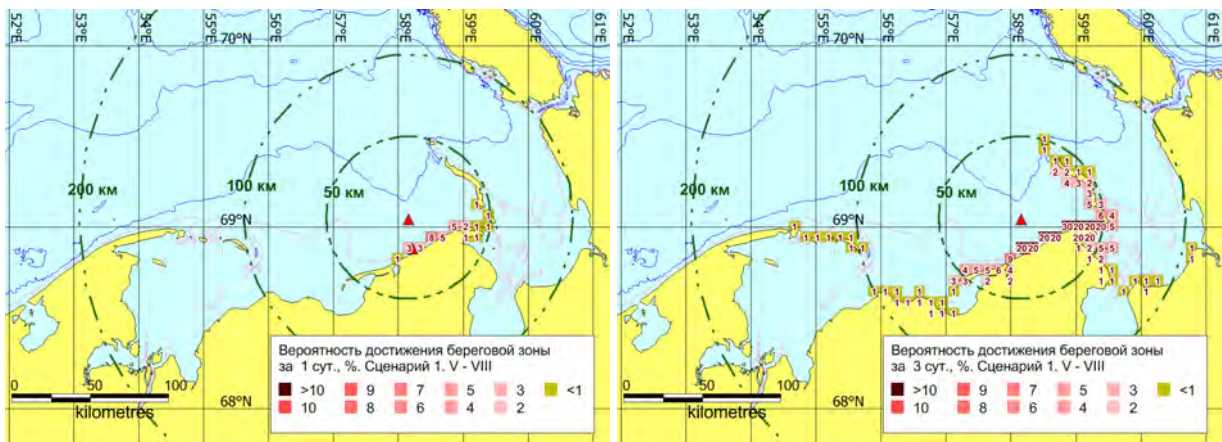
б



В

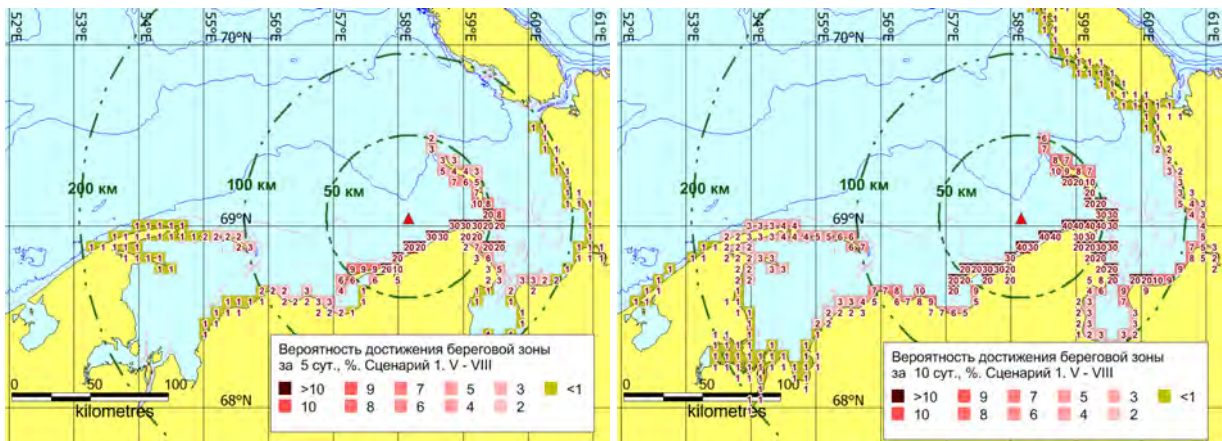
Г

Рисунок 5.36. Вероятность воздействия на побережье в зимний сезон (I-IV). Сценарий 1. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



а

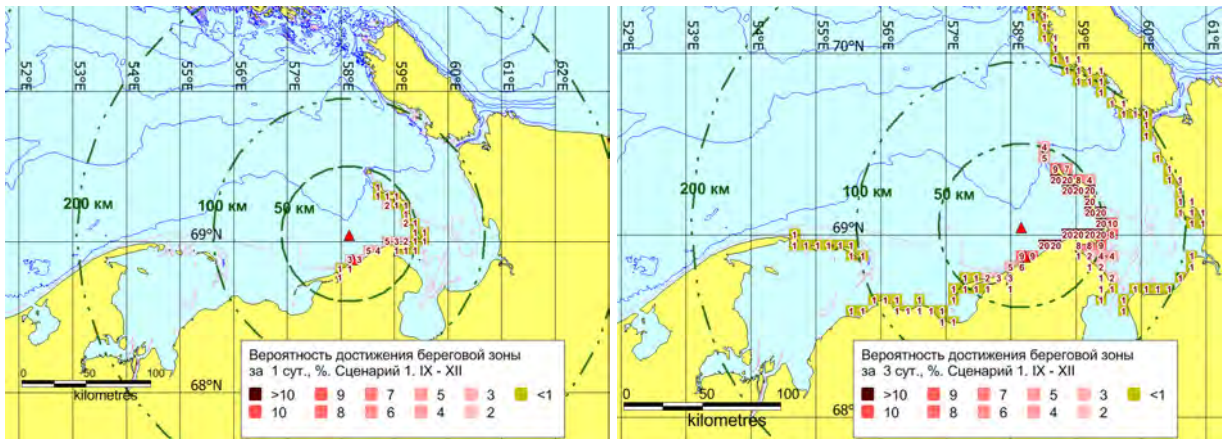
б



в

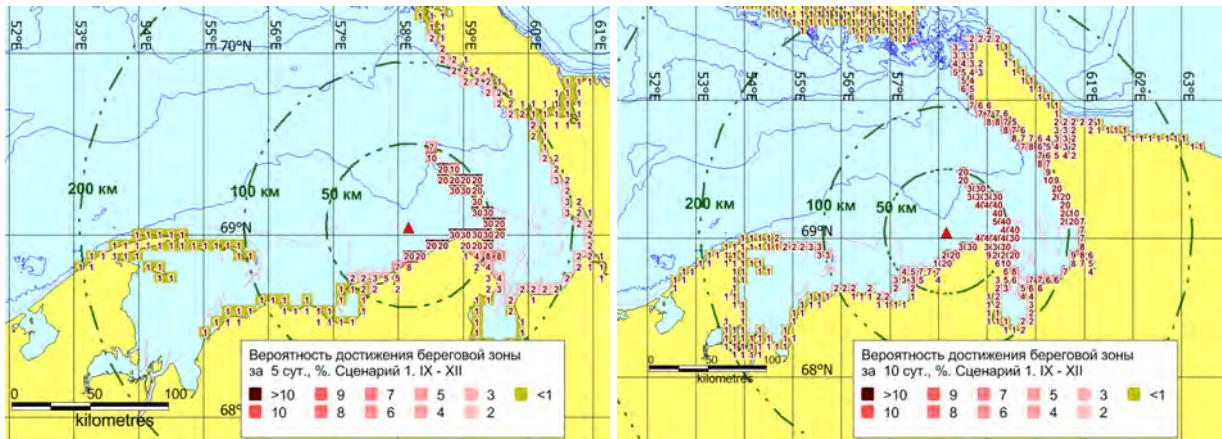
г

Рисунок 5.37. Вероятность воздействия на побережье летом (V-VIII). Сценарий 1. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



а

б



в

г

Рисунок 5.38. Вероятность воздействия на побережье осенью (IX-XII). Сценарий 1. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток

### 5.5.2. Зоны риска распространения нефти. Вероятности воздействия на акваторию и побережье. Сценарий 2

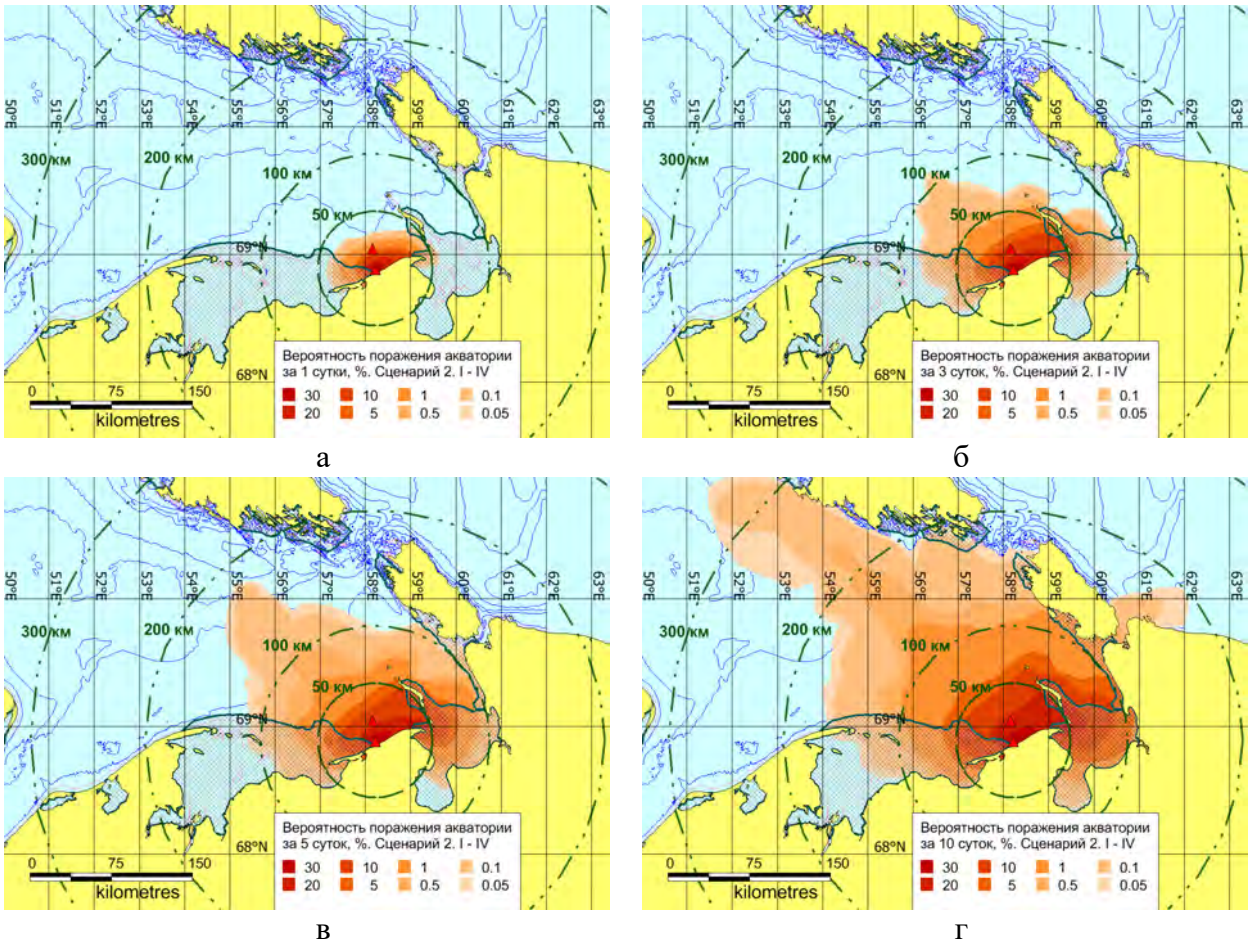
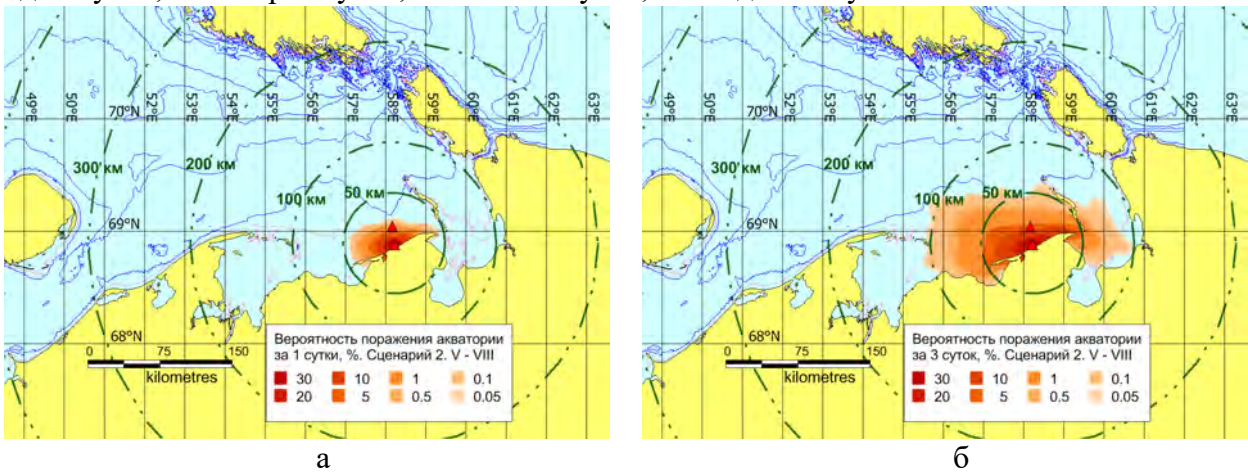
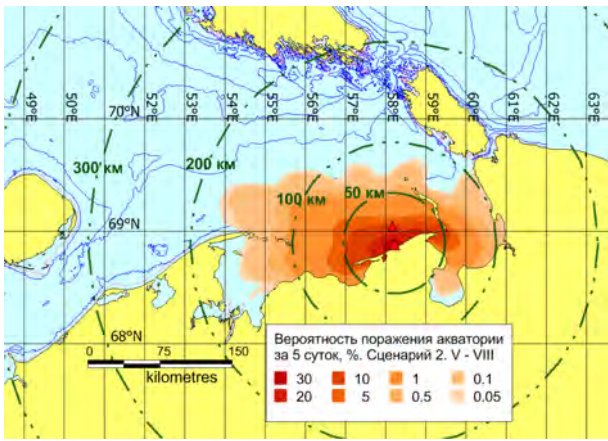
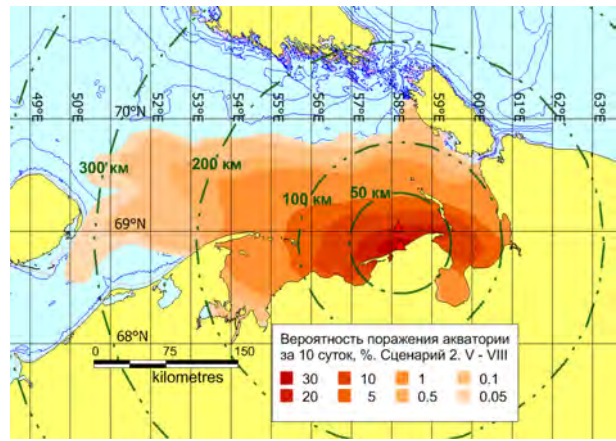


Рисунок 5.39. Вероятность воздействия на акваторию в зимний сезон (I-IV). Сценарий 2, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



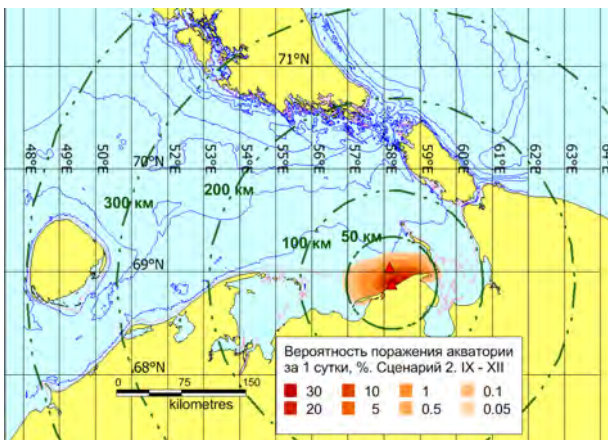


В

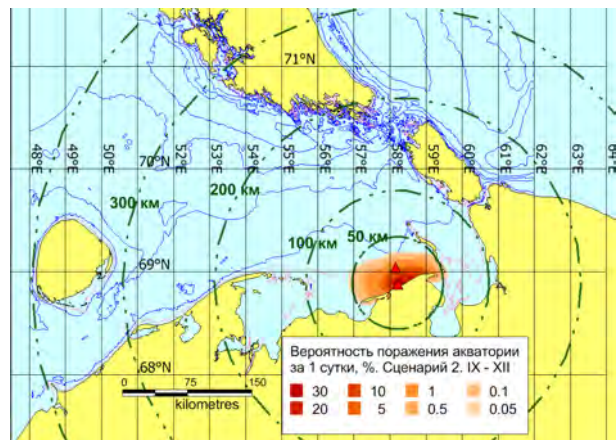


Г

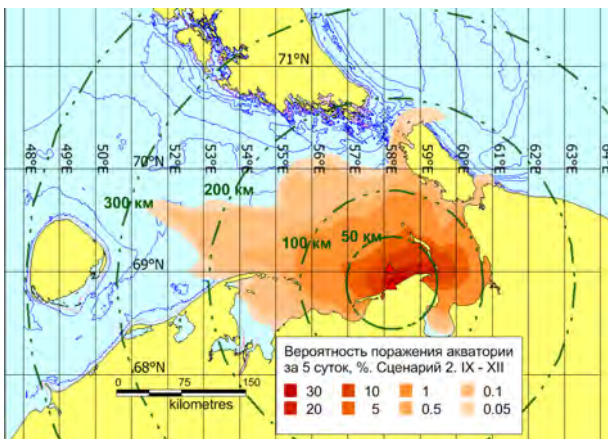
Рисунок 5.40. Вероятность воздействия на акваторию летом (V-VIII). Сценарий 2, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



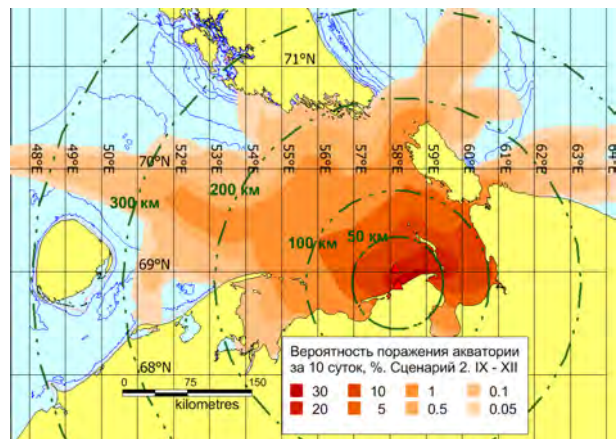
а



б

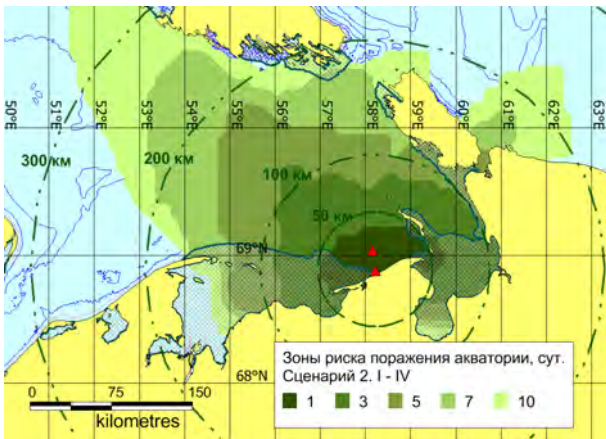


в

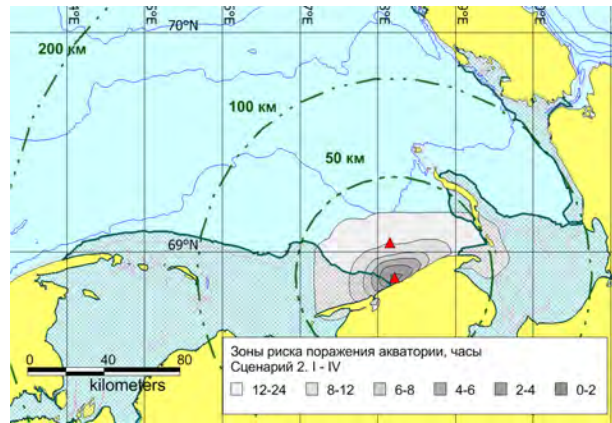


г

Рисунок 5.41. Вероятность воздействия на акваторию осенью (IX-XII). Сценарий 2, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток

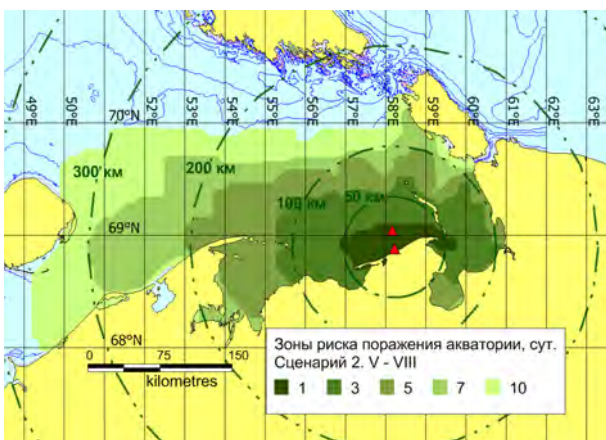


а

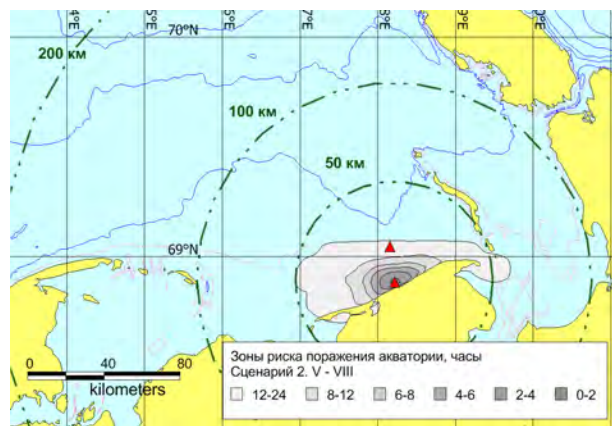


б

Рисунок 5.42. Зоны риска распространения нефти в зимний сезон (I-IV). Сценарий 2. а – зоны риска распространения нефти (сутки), б – зоны риска распространения нефти (часы)

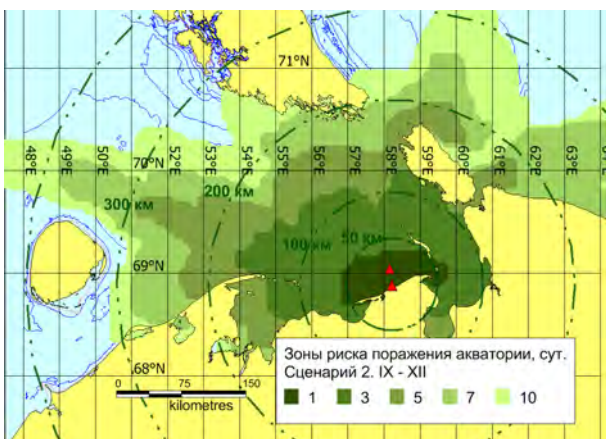


а

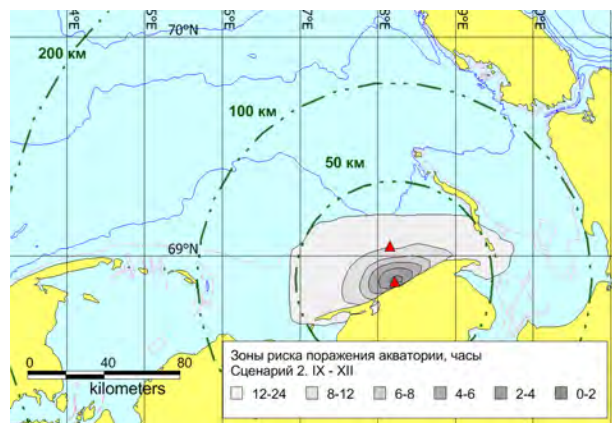


б

Рисунок 5.43. Зоны риска распространения нефти летом (V-VIII). Сценарий 2. а – зоны риска распространения нефти (сутки), б – зоны риска распространения нефти (часы)

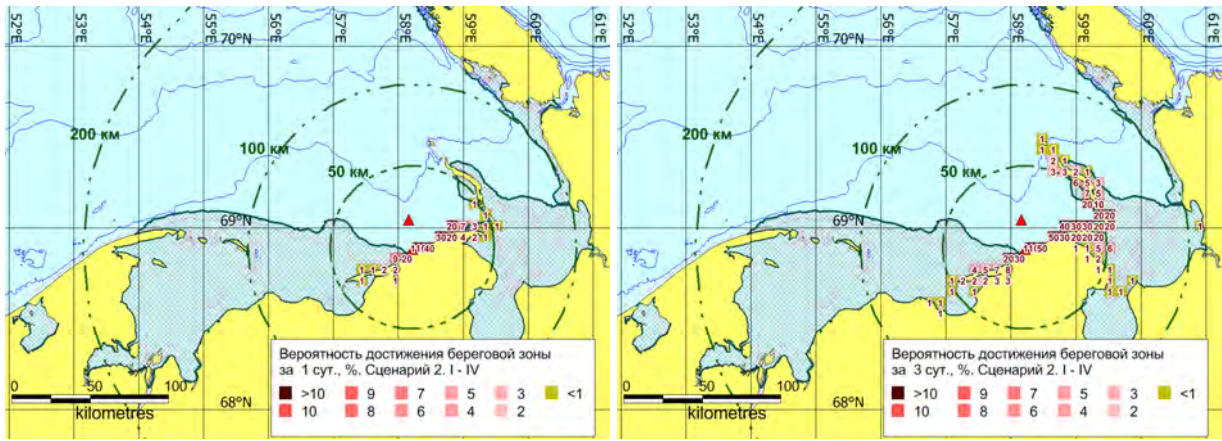


а



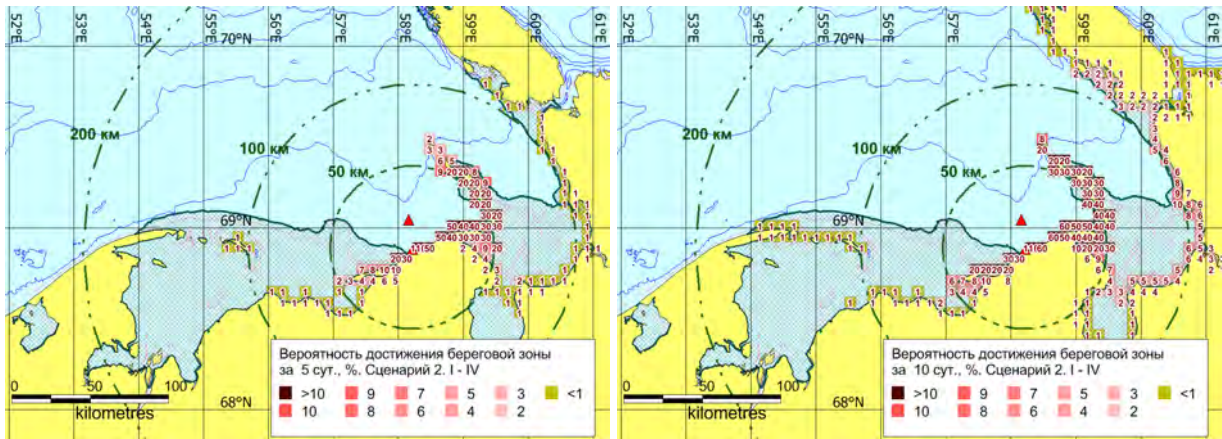
б

Рисунок 5.44. Зоны риска распространения нефти осенью (IX-VII). Сценарий 2. а – зоны риска распространения нефти (сутки), б – зоны риска распространения нефти (часы)



а

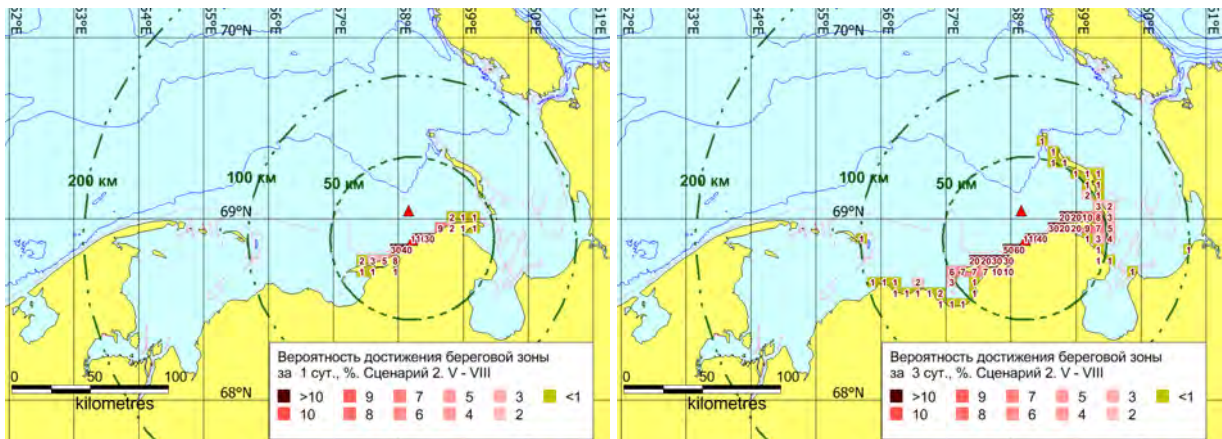
б



в

г

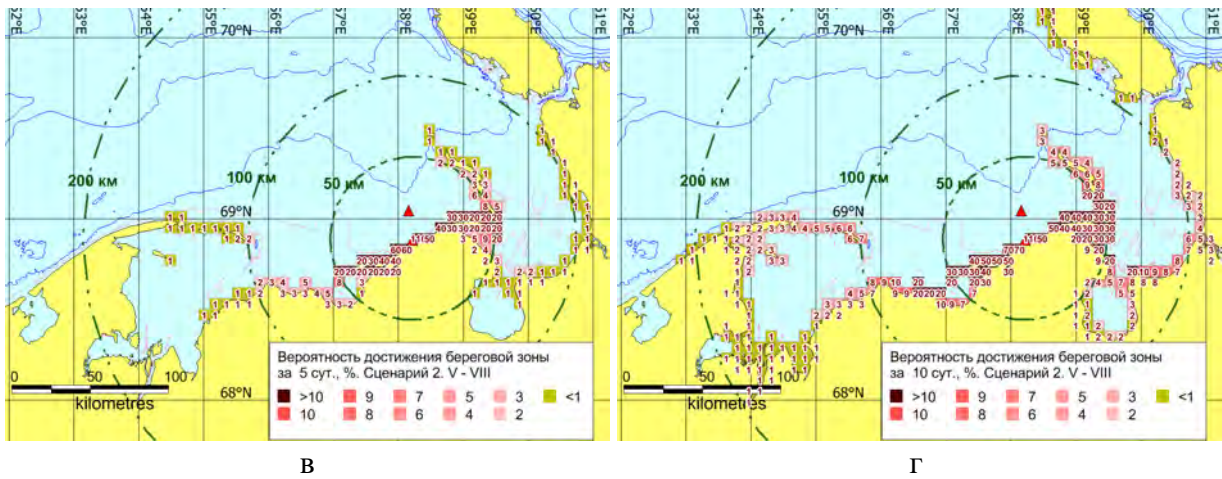
Рисунок 5.45. Вероятность воздействия на побережье в зимний сезон (I-IV). Сценарий 2. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



а

б

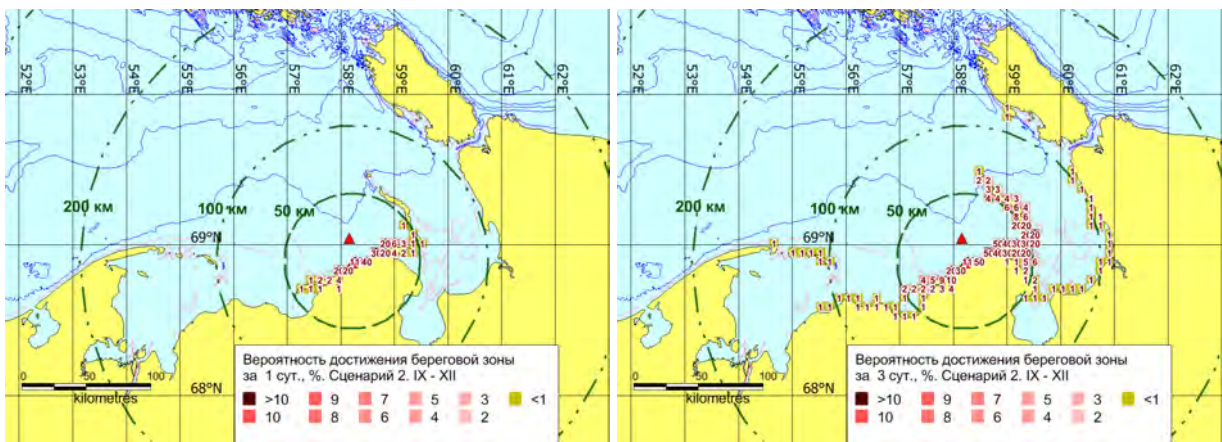




В

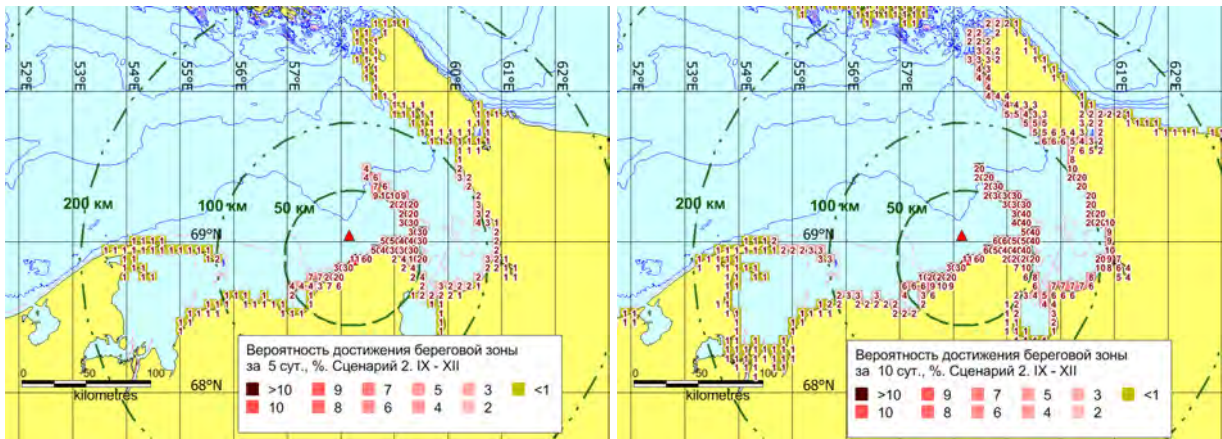
Г

Рисунок 5.46. Вероятность воздействия на побережье летом (V-VIII). Сценарий 2. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



а

б



в

г

Рисунок 5.47. Вероятность воздействия на побережье осенью (IX-XII). Сценарий 2. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток

### 5.5.3. Зоны риска распространения нефти, Вероятности воздействия на акваторию и побережье. Сценарий 3

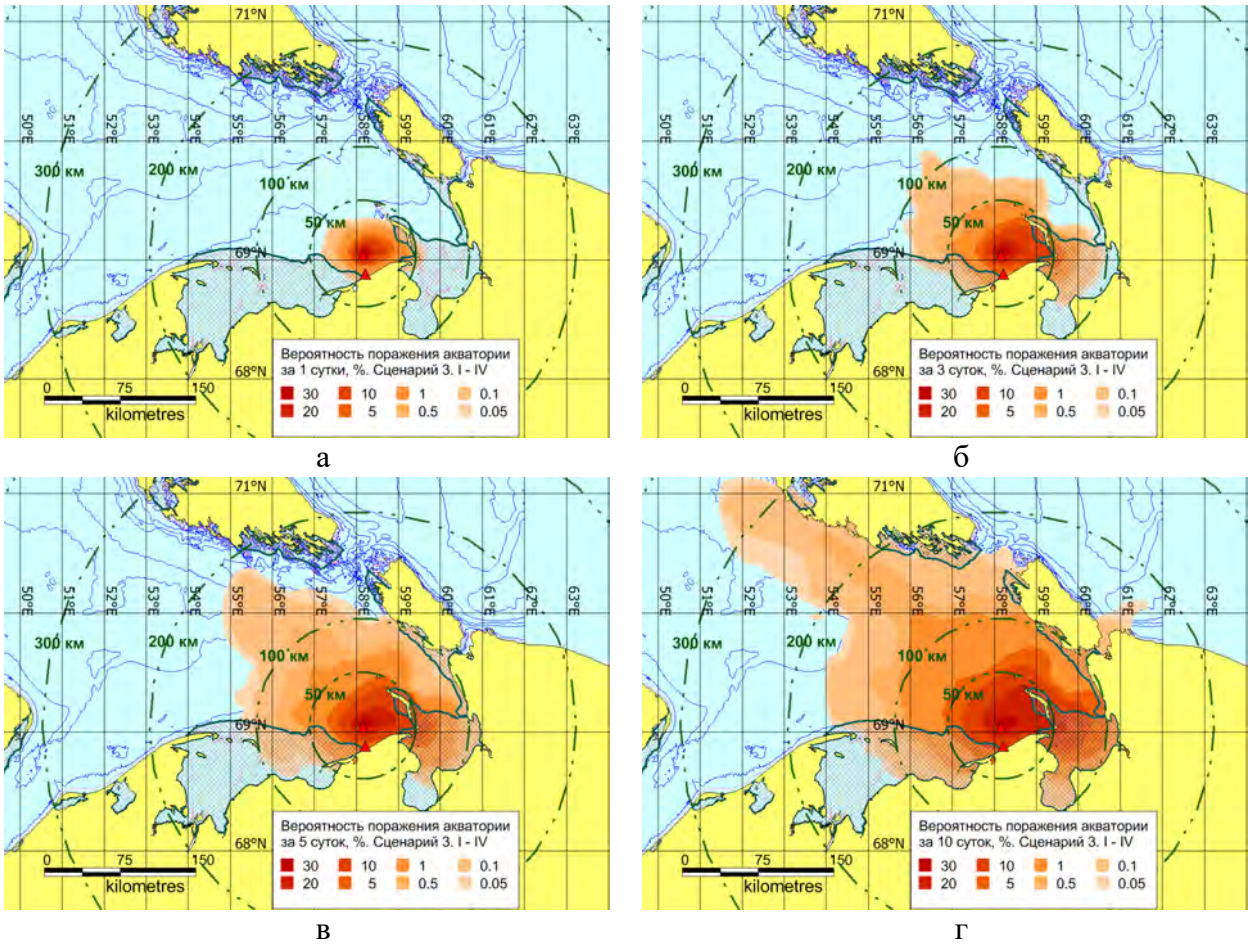
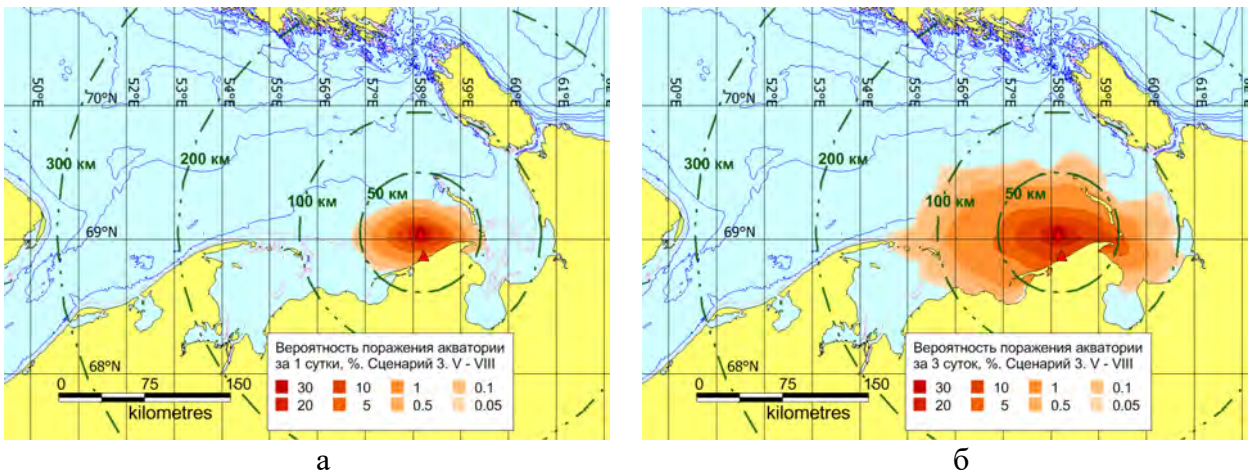
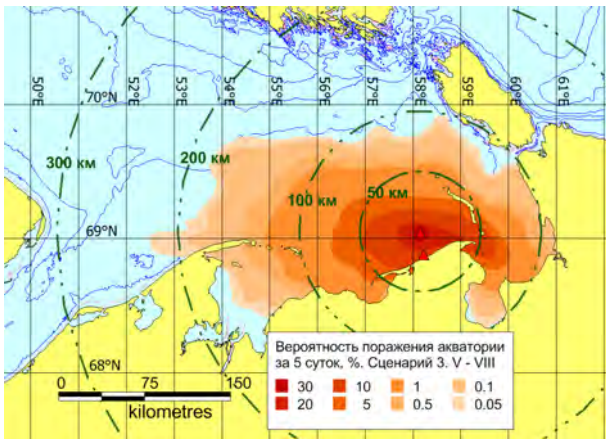
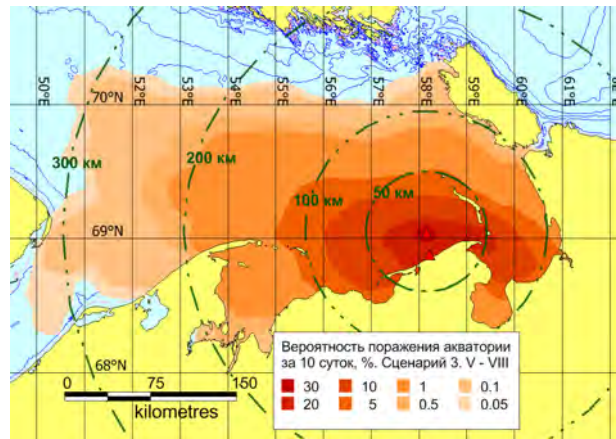


Рисунок 5.48. Вероятность воздействия на акваторию в зимний сезон (I-IV). Сценарий 3, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



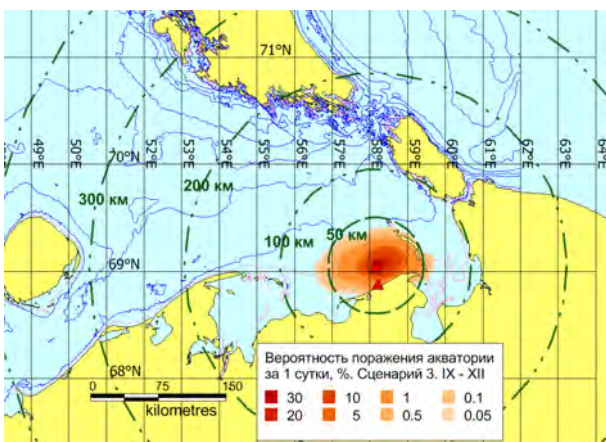


В

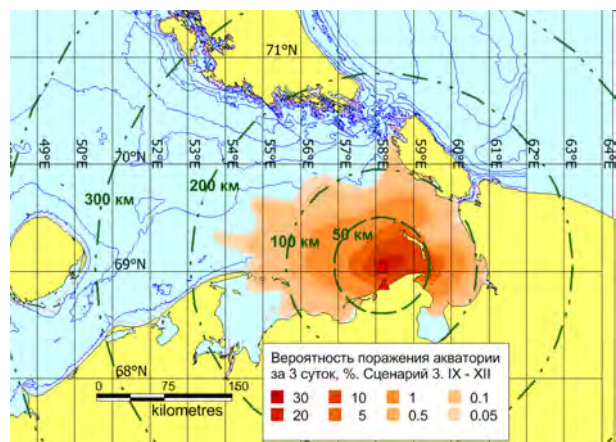


Г

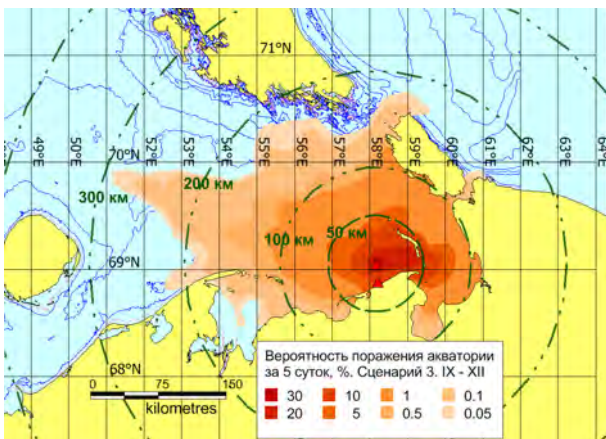
Рисунок 5.49. Вероятность воздействия на акваторию летом (V-VIII). Сценарий 3, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



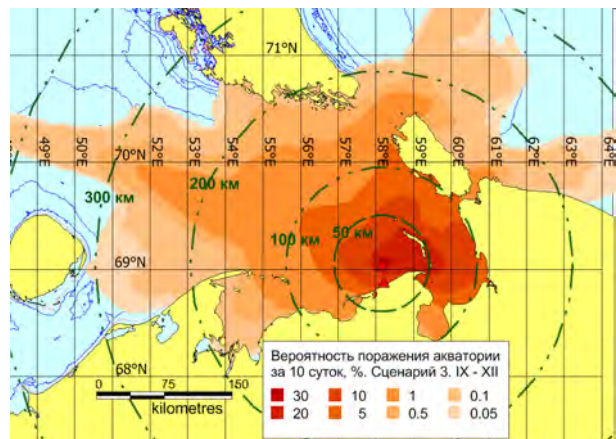
а



б

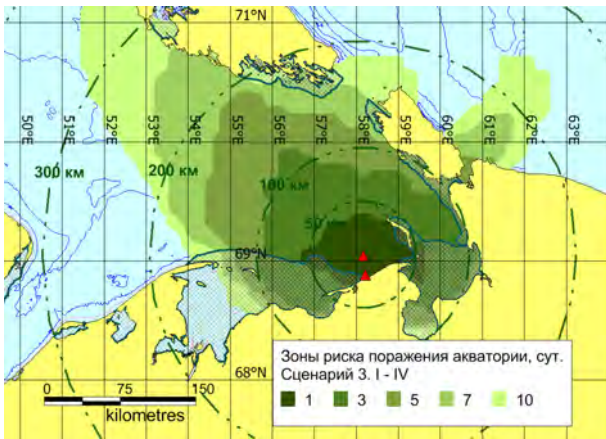


в

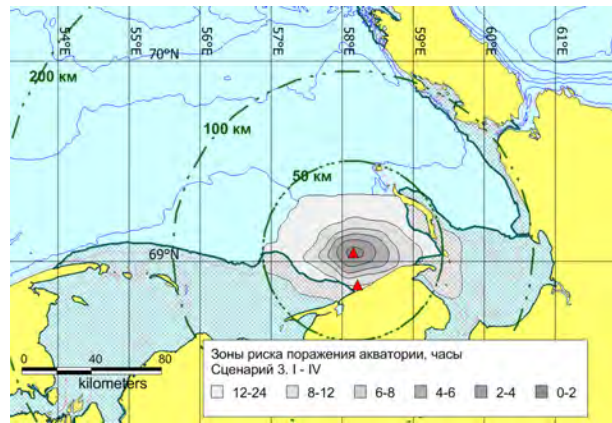


г

Рисунок 5.50. Вероятность воздействия на акваторию осенью (IX-XII). Сценарий 3, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток

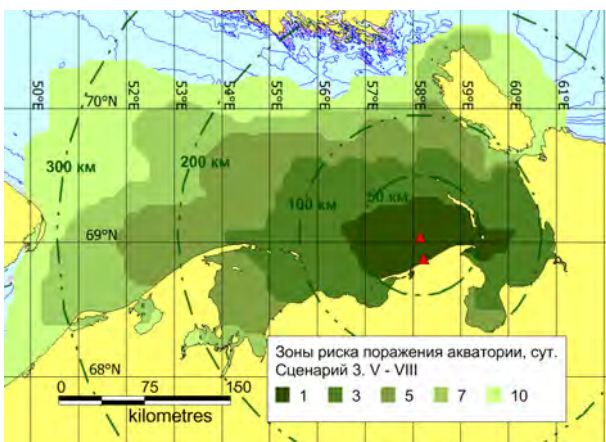


а

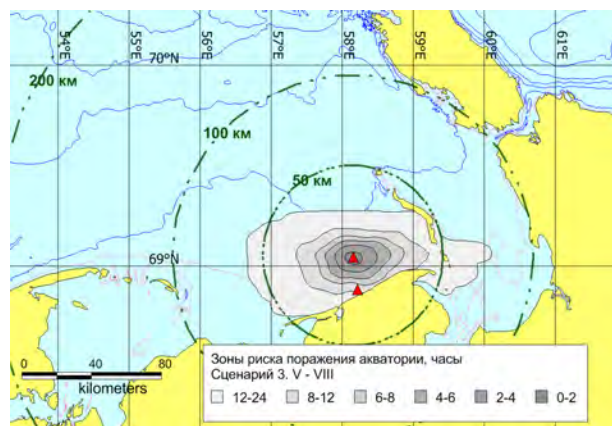


б

Рисунок 5.51. Зоны риска распространения нефти в зимний сезон (I-IV). Сценарий 3. а – зоны риска распространения нефти (сутки), б – зоны риска распространения нефти (часы)

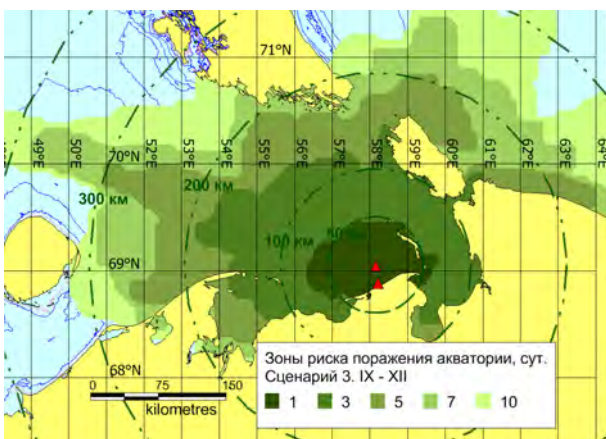


а

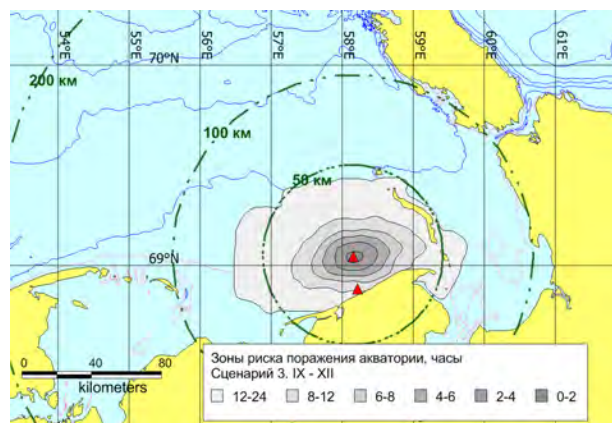


б

Рисунок 5.52. Зоны риска распространения нефти летом (V-VIII). Сценарий 3. а – зоны риска распространения нефти (сутки), б – зоны риска распространения нефти (часы)

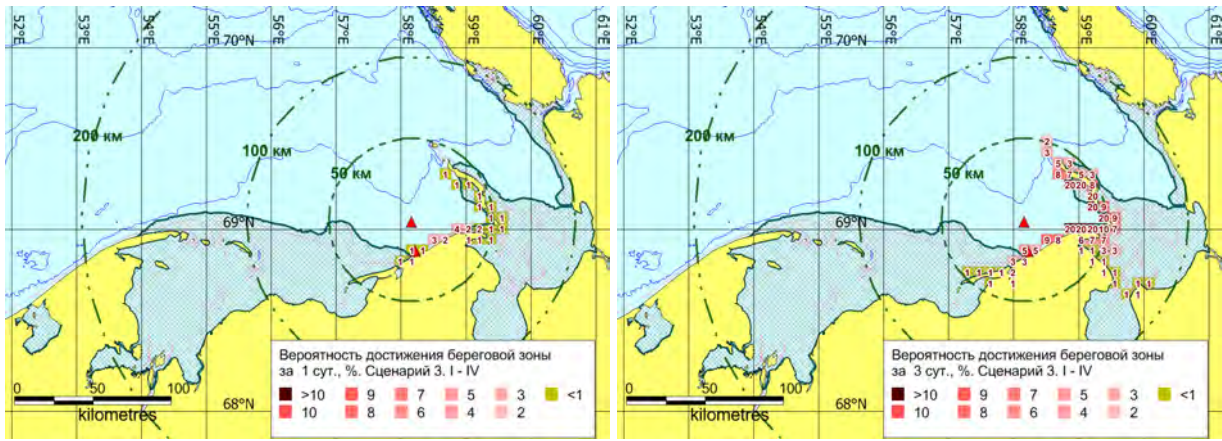


а



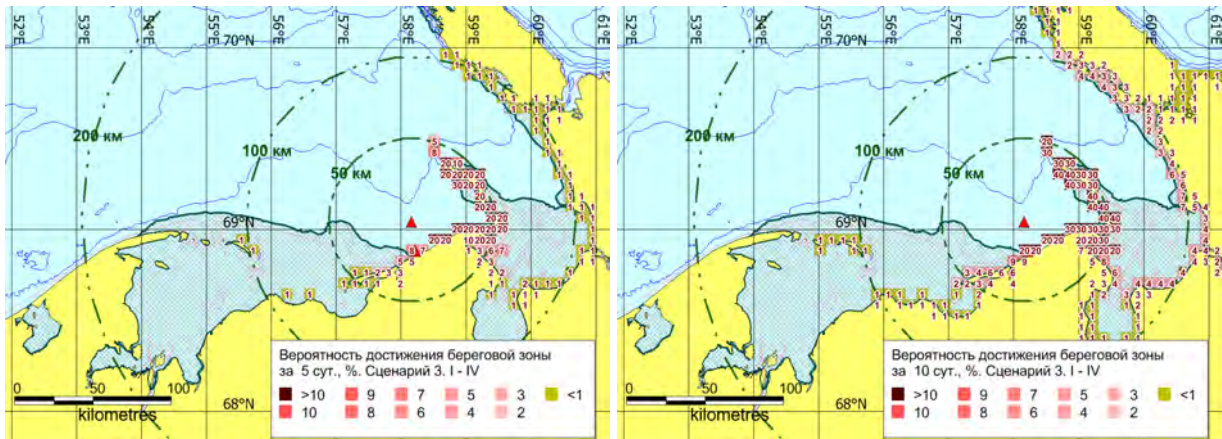
б

Рисунок 5.53. Зоны риска распространения нефти осенью (IX-XII). Сценарий 3. а – зоны риска распространения нефти (сутки), б – зоны риска распространения нефти (часы)



а

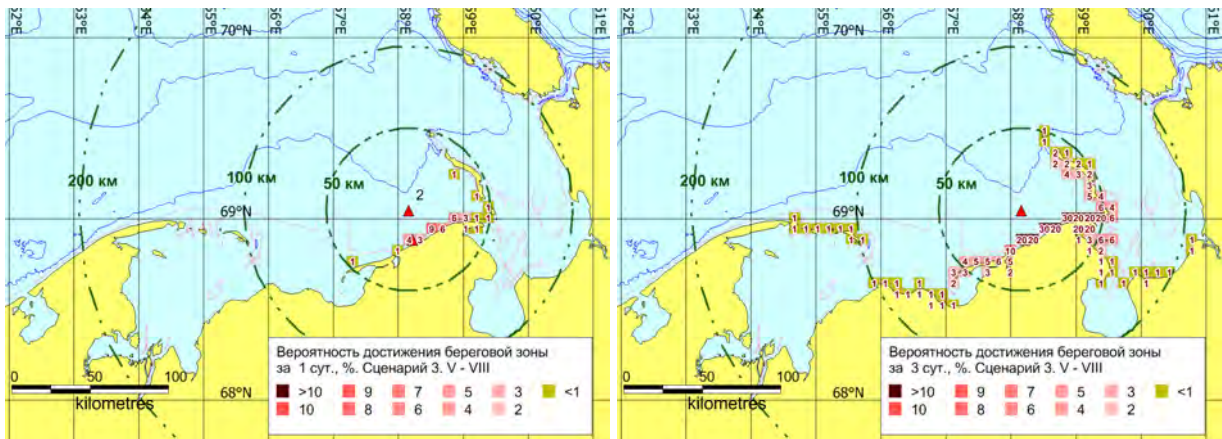
б



в

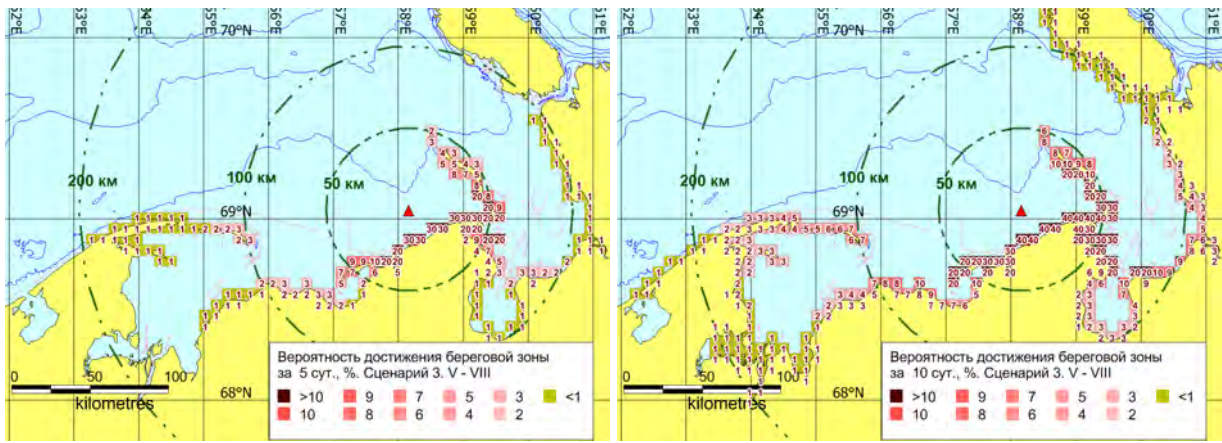
г

Рисунок 5.54. Вероятность воздействия на побережье в зимний сезон (I-IV). Сценарий 3, толщина пленки  $>10$  мкм. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



а

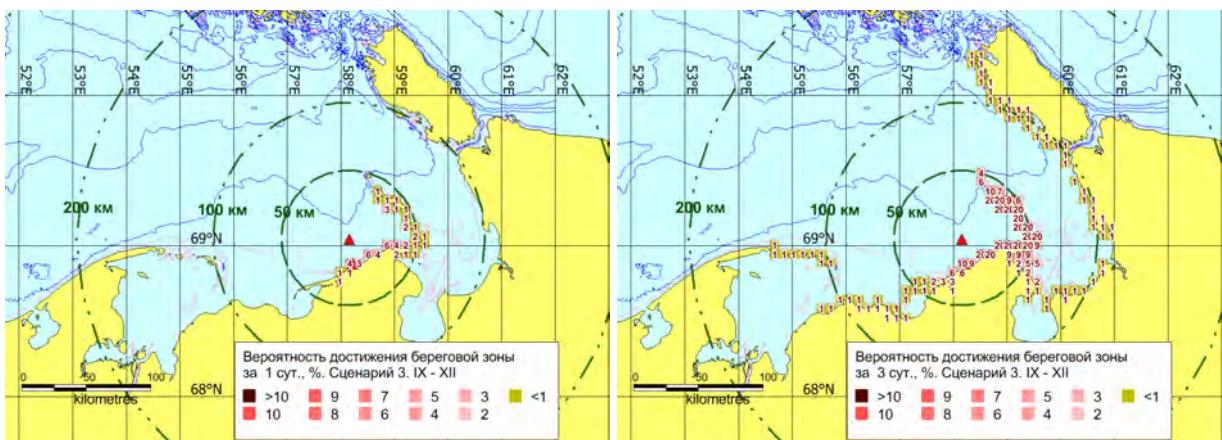
б



В

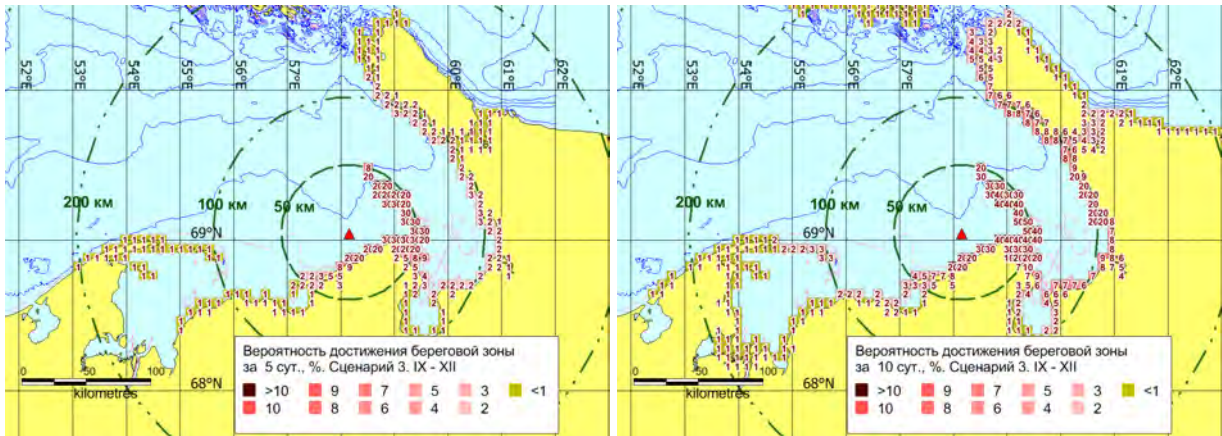
Г

Рисунок 5.55. Вероятность воздействия на побережье летом (V-VIII). Сценарий 3. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



а

б



в

Г

Рисунок 5.56. Вероятность воздействия на побережье осенью (IX-XII). Сценарий 3. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток

### 5.5.4. Зоны риска распространения нефти. Вероятности воздействия на акваторию и побережье. Сценарий 4

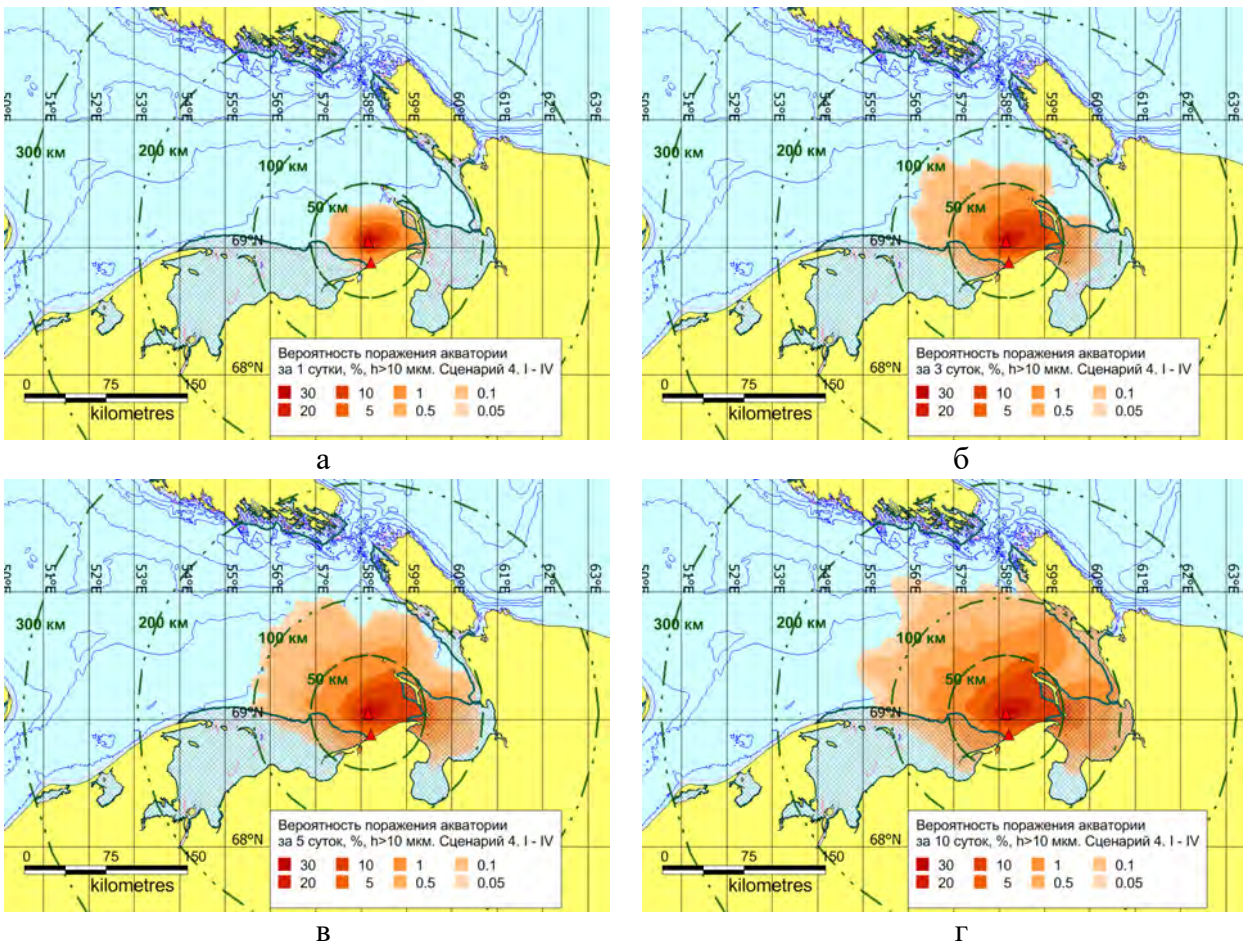
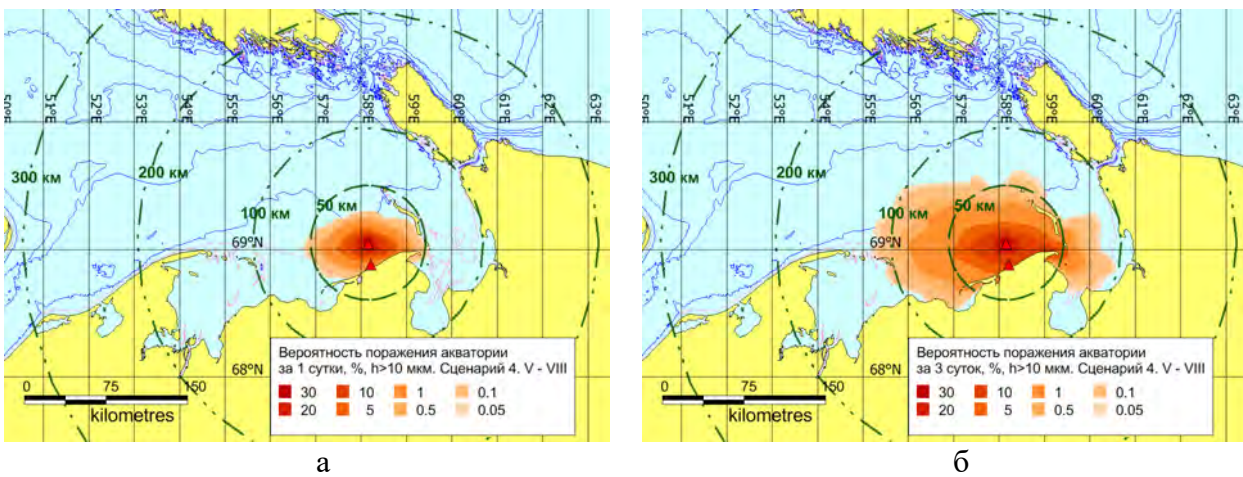
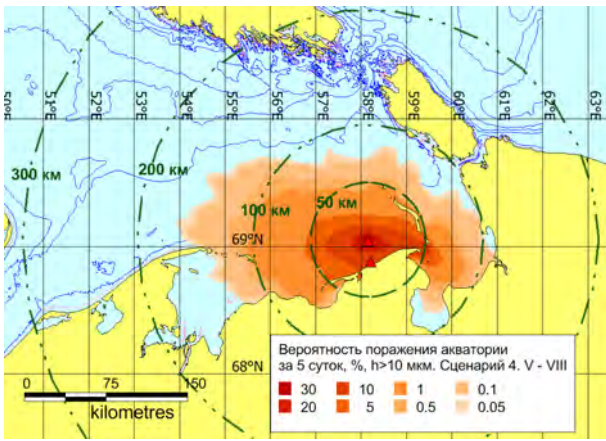
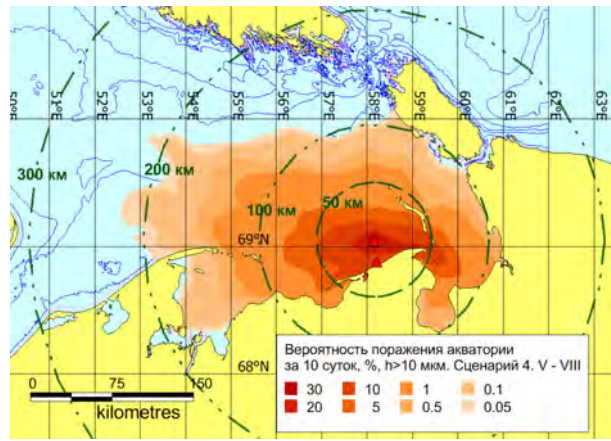


Рисунок 5.57. Вероятность воздействия на акваторию в зимний сезон (I-IV). Сценарий 4, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



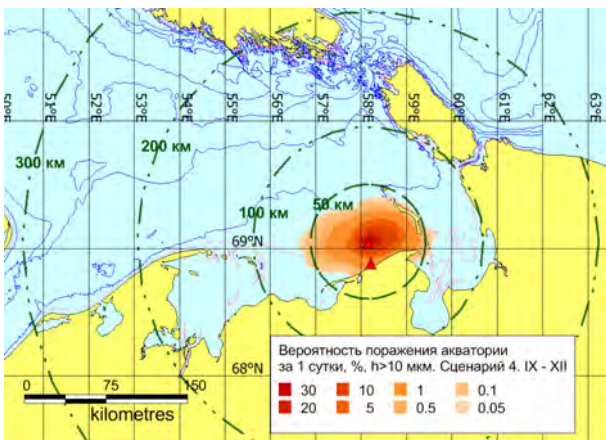


В

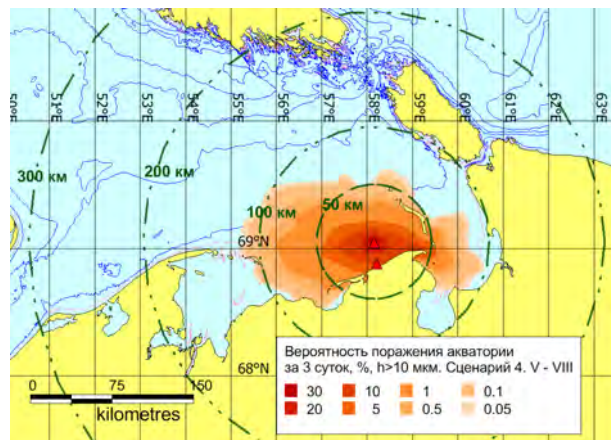


Г

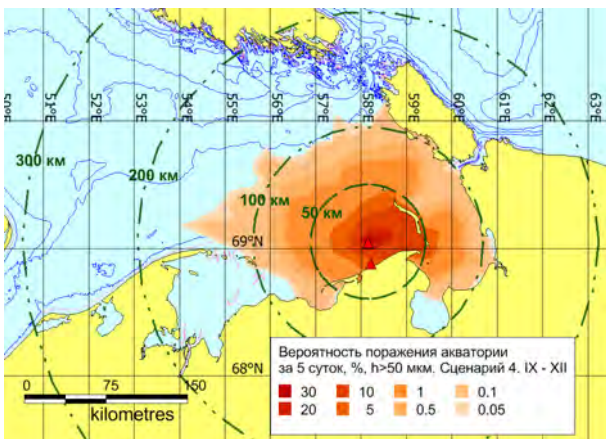
Рисунок 5.58. Вероятность воздействия на акваторию летом (V-VIII). Сценарий 4, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



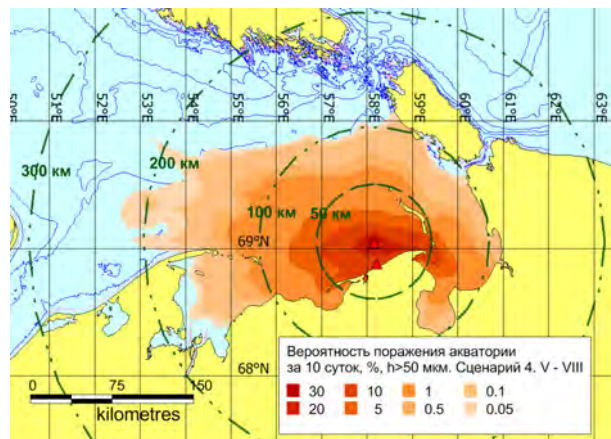
а



б



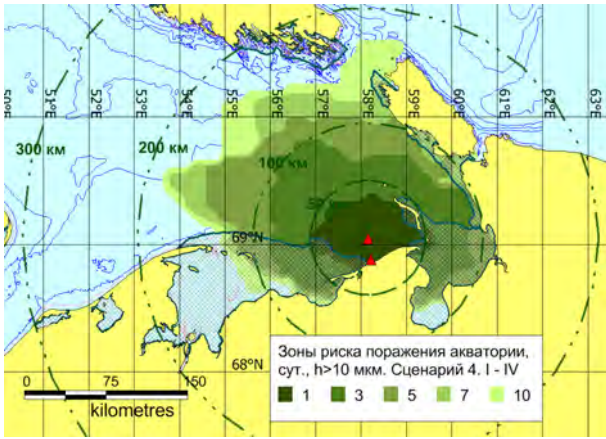
в



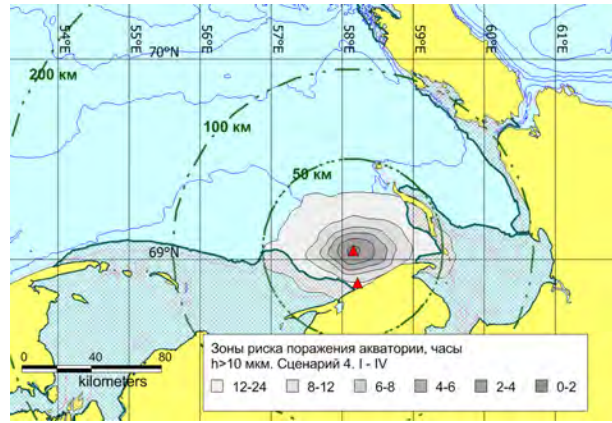
г

Рисунок 5.59. Вероятность воздействия на акваторию осенью (IX-XII). Сценарий 4, а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



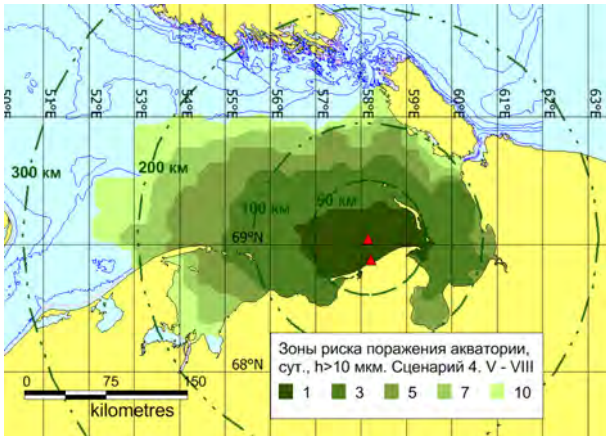


а

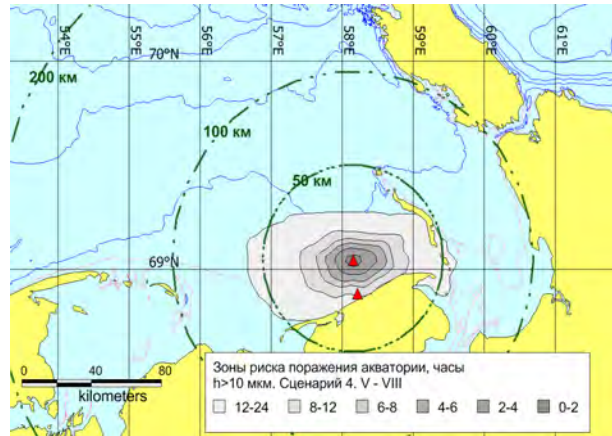


б

Рисунок 5.60. Зоны риска распространения нефти в зимний сезон (I-IV). Сценарий 4, толщина пленки  $> 10$  мкм. а – зоны риска распространения нефти (сутки), б – зоны риска распространения нефти (часы)

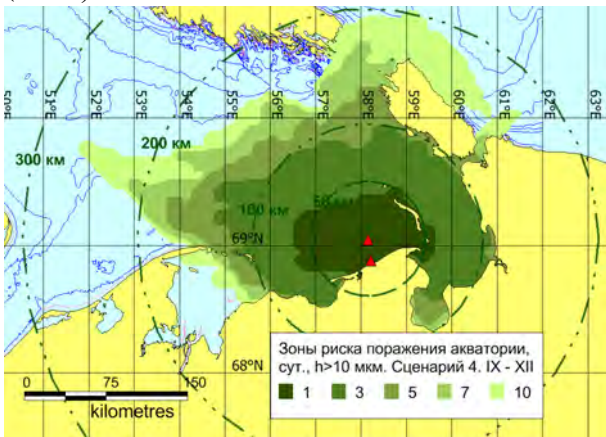


а

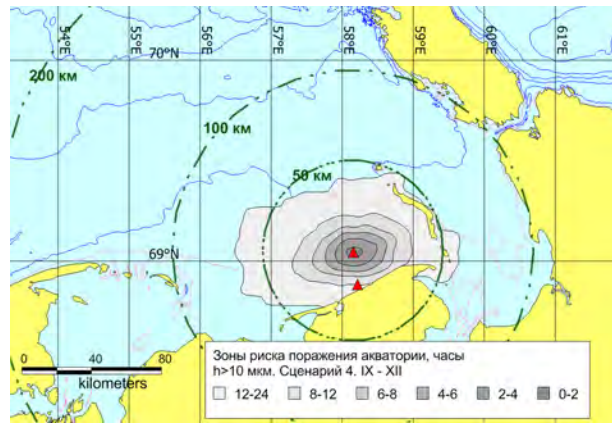


б

Рисунок 5.61. Зоны риска распространения нефти летом (V-VIII). Сценарий 4, толщина пленки  $> 10$  мкм. а – зоны риска распространения нефти (сутки), б – зоны риска распространения нефти (часы)

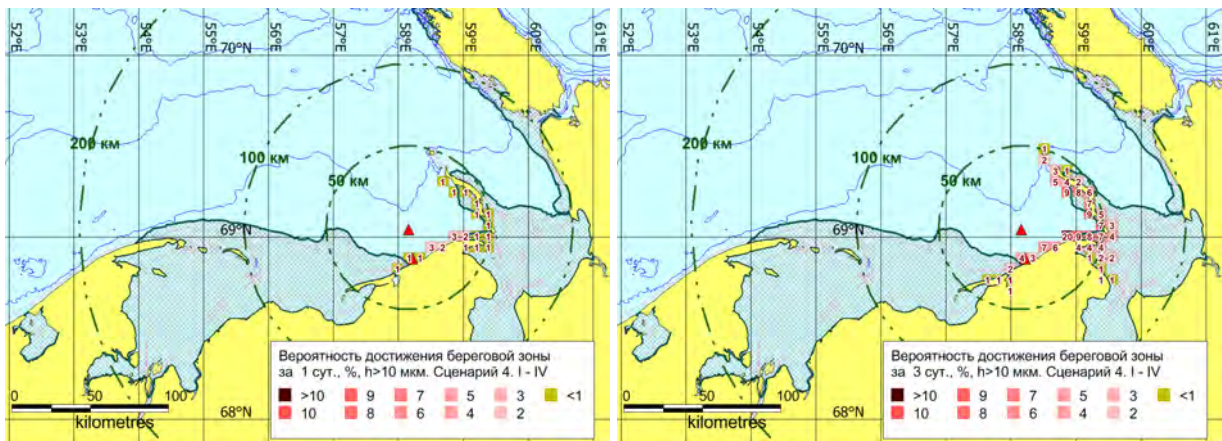


а



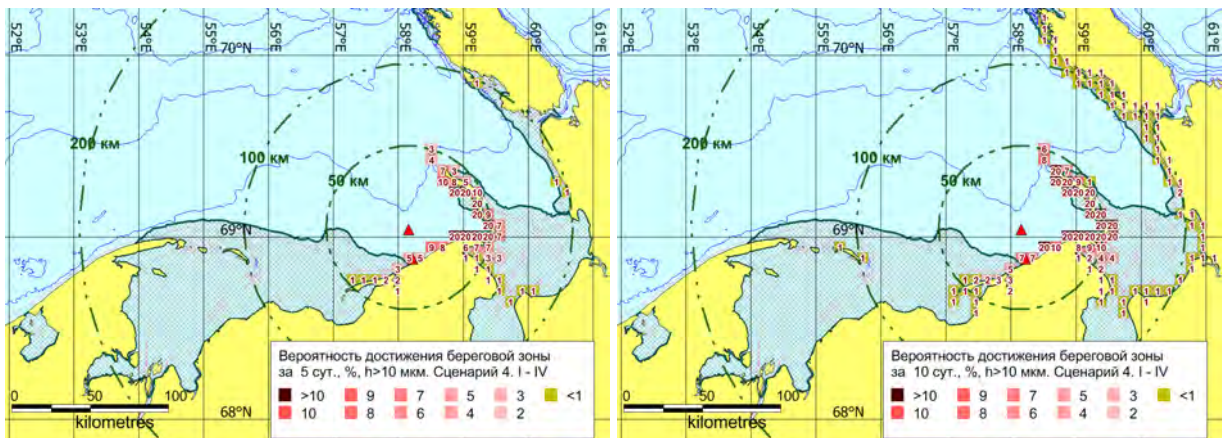
б

Рисунок 5.62. Зоны риска распространения нефти осенью (IX-XII). Сценарий 4, толщина пленки  $> 10$  мкм. а – зоны риска распространения нефти (сутки), б – зоны риска распространения нефти (часы)



а

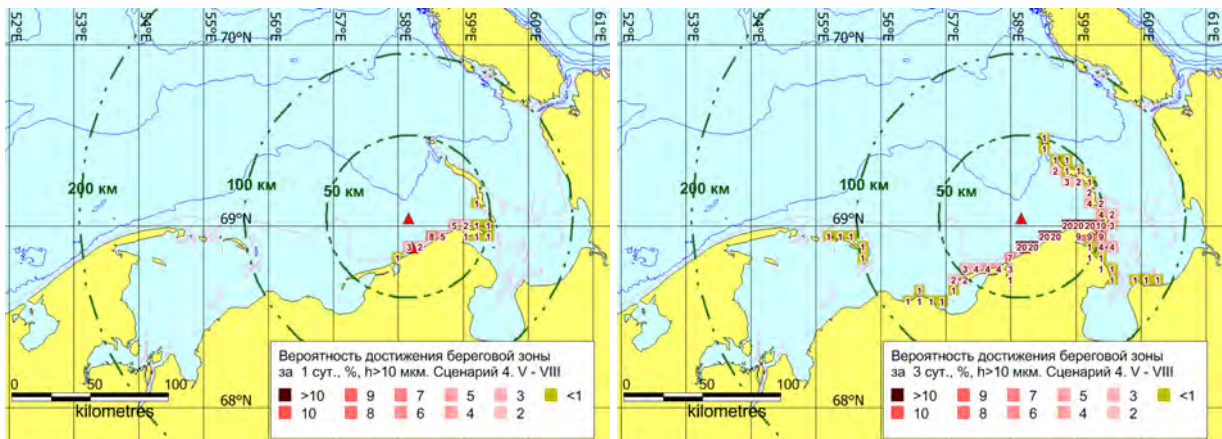
б



в

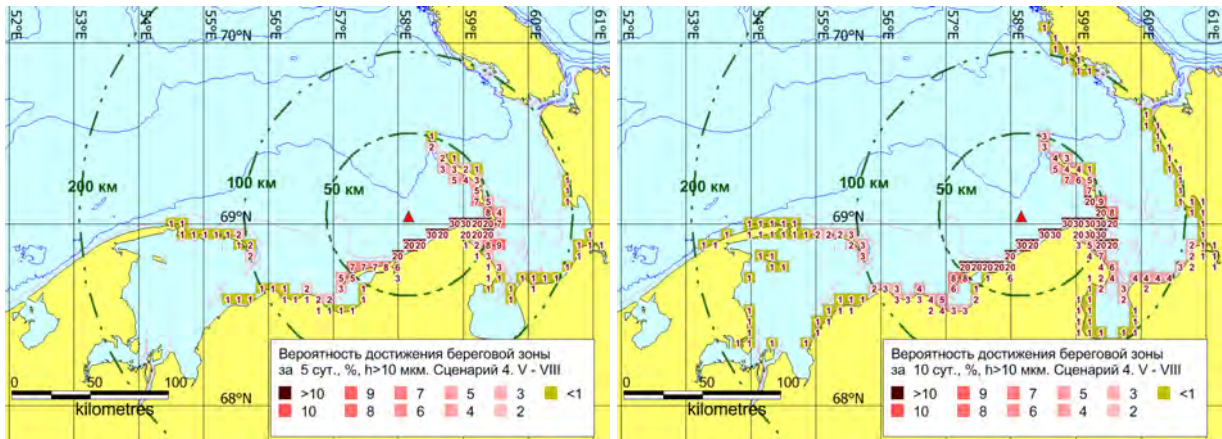
г

Рисунок 5.63. Вероятность воздействия на побережье в зимний сезон (I-IV). Сценарий 4, толщина пленки  $>10$  мкм. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



а

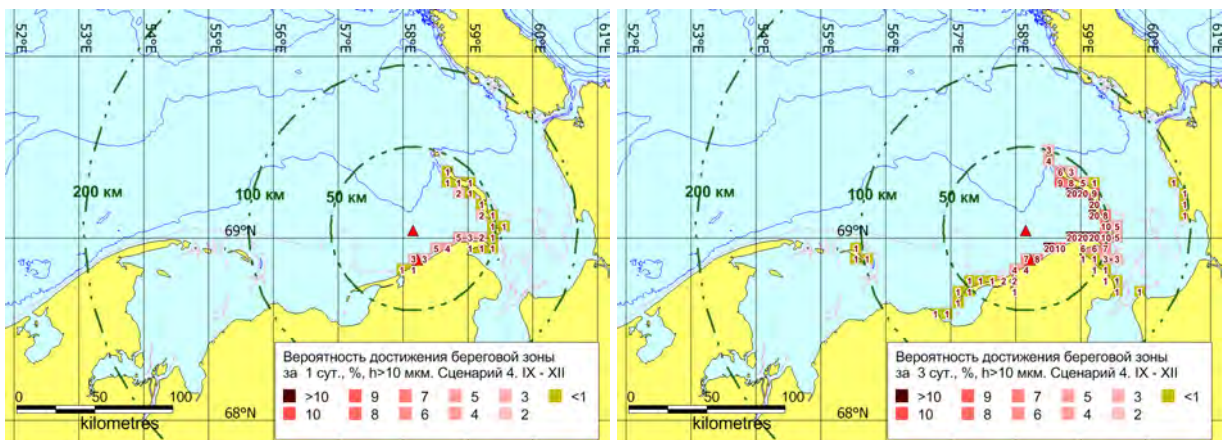
б



В

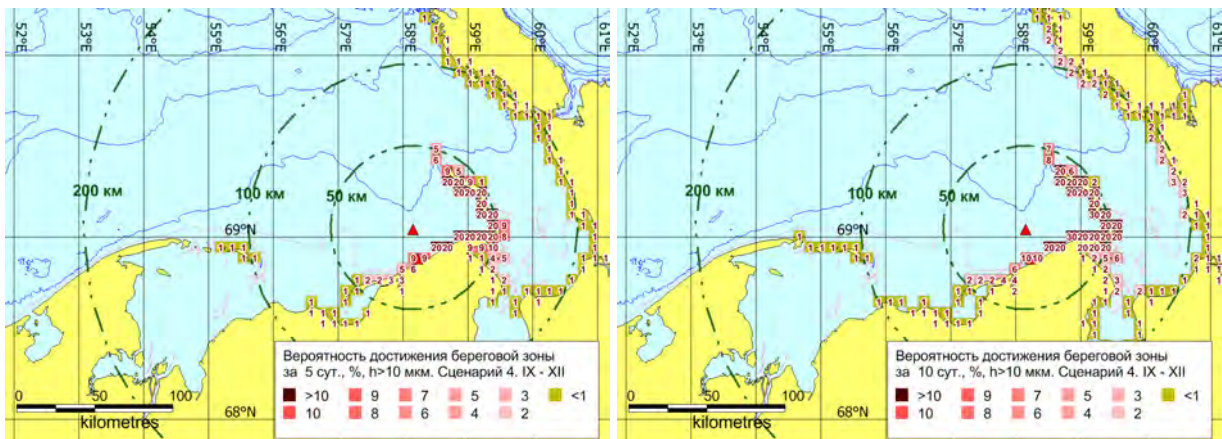
Г

Рисунок 5.64. Вероятность воздействия на побережье летом (V-VIII). Сценарий 4, толщина пленки >10 мкм. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток



а

б



В

Г

Рисунок 5.65. Вероятность воздействия на побережье осенью (IX-XII). Сценарий 4, толщина пленки >10 мкм. а – за одни сутки, б – за трое суток, в – за пять суток, г – за десять суток

## 6. ПРИЛОЖЕНИЯ

### 6.1. Общее описание физико-химической трансформации разлива нефти в морской среде

Одним из самых важных процессов является гравитационное растекание нефти на поверхности моря. Благодаря растеканию пленка нефтяного загрязнения может покрывать десятки и сотни квадратных километров морской поверхности.

Выветривание или "старение" нефти на поверхности моря – изменение физико-химических свойств и фракционного состава вызывают несколько процессов – испарение и растворение легких фракций, проникновение капель нефти в воду и обратный процесс, формирование эмульсии типа вода в нефти.

Кроме того, в морской среде происходит сорбирование нефти твердыми частицами, образование агрегатов и их последующее осаждение на дно, взаимодействие с береговой линией и/или со льдом, фотохимические реакции и биodeградация. Последние два процесса могут изменять физико-химические свойства и уменьшать количество нефти в морской среде на длительных временных масштабах.

Основной причиной загрязнения нефтью водной толщи является диспергирование пленки нефти при обрушении ветровых волн, в результате чего образуется эмульсия типа «нефть в воде», и возникает шлейф загрязнения в верхнем слое моря с возможной последующей адсорбцией капель нефти на взвешенных минеральных частицах. При увеличении плотности нефти за счет эмульгирования, испарения легких фракций и под влиянием низких температур возможно оседание нефти на дно, с образованием зон донного загрязнения.

Трансформация и перенос нефтяного разлива в воде происходит в результате целого набора сложных, взаимосвязанных физико-химических процессов, протекание которых зависит от свойств нефти и гидрометеорологических условий. На Рисунке 1.1 показаны основные процессы (1 – 14), определяющие эволюцию нефтяного разлива после попадания в море, перечислены состояния нефтяного загрязнения (I – IX) и указаны различные среды (a – i), в которых происходит физико-химическая трансформация нефти. Прежде чем дать пояснения упомянутым на Рисунке 1.1 процессам трансформации нефтяного разлива, заметим, что нефть в морской среде после аварийного сброса может присутствовать в различных состояниях: I. захваченная льдами нефть; II. нефть в виде линз подо льдом; III. нефть в солевых каналах; IV. нефть в виде линз внутри снежного покрова; V. капли нефти, инкапсулированные в лед; VI. нефть, скопившаяся в ледяной каше; VII. нефть, диспергированная в водной толще; VIII. нефтяная эмульсия; IX. нефть в пленочной форме на поверхности моря.

Морская среда весьма разнообразна и нефтяной разлив может трансформироваться в различных условиях, среди: a) многолетних льдов; b) однолетних льдов; c) в снегу; d) в разводьях между льдин; e) в проталинах при весеннем таянии; f) в дрейфующем льду; g) поверхности моря; h) в водной толще; i) в береговой зоне. Взаимодействие с берегом происходит за счет переноса нефти в направлении берега поверхностными течениями, выноса пленки нефти волнами и осаждение на элементах берегового ландшафта (пляжи, камни, марши, и пр.).

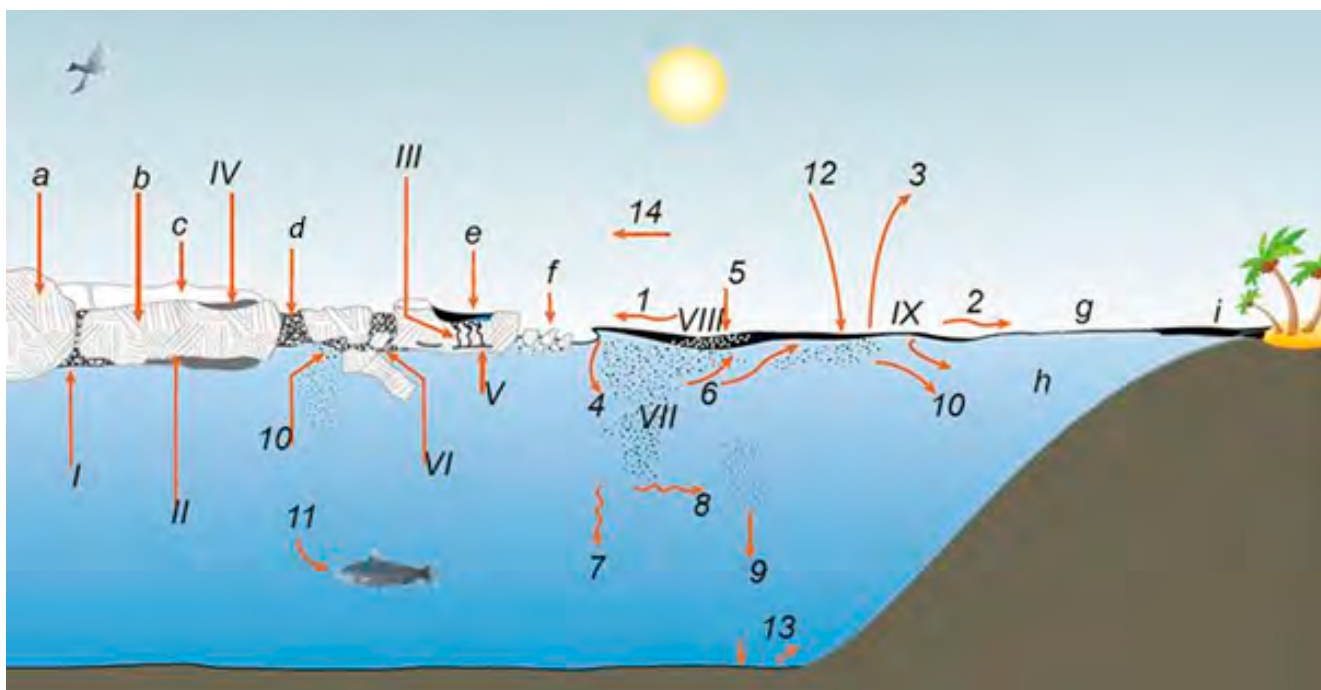


Рисунок 6.1 Совокупность состояний нефтяного разлива в морской среде и основных процессов трансформации в различных средах

В зависимости от состояния разлива нефти и условий, в которых происходит физико-химическая трансформация разлива, различные процессы могут рассматриваться как основные. Ниже даны краткие определения и пояснения упомянутых на рисунке процессов, от которых зависит судьба нефтяного разлива в море (Рисунок 6.1).

1. Перенос/адвекция – перемещение нефти по поверхности водного объекта под действием ветра, волн и течений.
2. Растекание – увеличение площади нефти на водной поверхности за счет положительной плавучести, поверхностного натяжения и турбулентной диффузии.
3. Испарение – физико-химический процесс, приводящий к массопереносу углеводородов с водной поверхности в атмосферу. Это основной процесс, связанный с атмосферой, в результате которого все легколетучие фракции нефти удаляются из нефтяного пятна в течение первых нескольких часов/суток после разлива нефти. Другая важная роль процесса испарения заключается в изменении физических и химических свойств оставшейся на поверхности моря нефти, в частности, ее плотности, вязкости и межфазного натяжения.
4. Проникновение нефти в водную толщу или диспергирование – перенос нефти из пленочной фазы с поверхности в водную толщу, вызванный обрушением волн, образование эмульсии типа нефть-в-воде. Диспергирование представляет собой физический процесс, при котором вследствие обрушения гребней ветровых волн пленка нефти дробится на мелкие капли, некоторые из которых (самые крупные) всплывают обратно к поверхности, а мелкие распространяются процессами турбулентной диффузии в толщу воды. Диспергированная нефть подвергается растворению и биодеструкции.
5. Эмульсификация – физико-химический процесс формирования эмульсии типа вода-в-нефти, в результате чего она приобретает коричневый оттенок, и поэтому иногда именуется как «шоколадный мусс». Образование эмульсий приводит к существенным изменениям свойств и характеристик нефти.
6. Всплытие крупных капель нефти за счет положительной плавучести.
7. Вертикальная турбулентная диффузия.

8. Горизонтальная диффузия и перенос течениями.
9. Поглощение взвешенных минеральных частиц. При адсорбции капель нефти образуются агрегаты нефть-ил с соответствующим увеличением плотности. В результате осаждения на дне водного объекта образуются отложения адсорбированных нефтяных осадков. Количество образующихся агрегатов находится в прямой зависимости от концентрации взвешенных частиц в поверхностном слое моря. Наибольшая концентрация взвешенных частиц наблюдается в устьевых областях рек. Также высокая концентрация взвешенных частиц наблюдается в прибрежных зонах при эрозии берегов и в портовых районах при дноуглубительных работах.
10. Растворение – физико-химический процесс, в результате которого часть массы нефти (растворимых в воде фракций углеводородов) из пленочной или капельной фазы переходит в водную толщу. Этот массоперенос, происходящий вследствие молекулярной диффузии, протекает медленнее по сравнению с испарением. Однако именно растворенные в воде компоненты из нефтяного разлива оказывают токсическое воздействие на морские организмы.
11. Усвоение биотой (биодegradация) – биохимический процесс, изменяющий или разлагающий углеводороды нефти благодаря жизнедеятельности микроорганизмов, который приводит к уменьшению массы нефти в водной толще. В южных морях (при температуре воды 20°C – 25°C) процесс биодegradации протекает намного интенсивнее, по сравнению с северными холодными [Израэль и Цыбань, 1989; Измайлов, 1988].
12. Фотоокисление – трансформация нефтяных углеводородов под действием солнечного света в соединения с большей химической активностью и биологической доступностью. В результате фотоокисления увеличивается доля водорастворимых компонентов. Фотоокисление может быть важным при трансформации нефти в высоких широтах в условиях полярного дня [Измайлов, 1988]. Под воздействием солнечного света ароматические соединения в нефти окисляются до смол и, в конечном итоге, до асфальтенов.
13. Донное загрязнение.
14. Атмосферный перенос – перенос испарившихся нефтепродуктов в атмосфере.

## **6.2. Некоторые сведения о разливах тяжелой нефти и нефти с высокой температурой текучести**

Растекание нефти по любой поверхности, в том числе по поверхности воды, зависит не только от ее состава, но и от температуры окружающей среды. Если эта температура ниже, чем точка застывания, то нефть теряет свою текучесть. Именно поэтому в условиях холодного климата при прокачке некоторых типов тяжелой нефти и нефтепродуктов по трубам их приходится подогревать. При разливе нефти такого типа в море она не растекается по морской поверхности, а образует нефтяные конгломераты в виде дрейфующих полос или крупных комков, которые почти полностью погружены в воду [Патин, 2008, 2015].

Тяжелые топливные масла характеризуются высоким удельным весом, обычно в диапазоне 0,92 - 1,02 г/см<sup>3</sup>, и относительно высокой кинематической вязкостью, в диапазоне от 5000 до 30 000 МПа при 15° С. Некоторые вязкости еще выше, что в сочетании с высокими температурами застывания может сделать масла твердыми при температуре окружающего моря (10-25° С).



Рисунок 6.2. Нефть, разлитая в море при температуре ниже температуры застывания, образует полутвердые фрагменты.

На Рисунке 6.2 показана нефть Nile Blend, температура застывания  $+33^{\circ}\text{C}$ , в морской воде с температурой  $28^{\circ}\text{C}$ . Такая нефть имеет высокую стойкость и может перемещаться на большие расстояния [ИТОПФ, 2014].

При разливах тяжелых типов нефти с высокой вязкостью нефтяные пленки на поверхности моря быстро трансформируются в агрегированные вязкие или полутвердые фрагменты разного размера и разной формы. При пониженной температуре и сильном волнении эти процессы происходят особенно быстро и интенсивно, что следует иметь в виду при анализе ситуаций разливов в северных морях. За счет высокой вязкости нефтяные агрегаты хорошо сохраняются в морской воде. Их скопления могут длительное время дрейфовать на большие расстояния и наносить ущербы далеко от места разлива. Приведем несколько примеров такого рода [Патин, 2008]:

- После аварии танкера «Eleni V» в Северном море у берегов Великобритании в море поступило около 7500 тонн мазута. Спустя 2 месяца часть этого мазута в виде затвердевших нефтяных остатков была выброшена на побережье Нидерландов.

- При разливе более 1000 т мазута у берегов Южной Кореи твердые нефтяные комки были рассеяны и длительное время дрейфовали на обширной акватории в сотни квадратных километров.

- В 1998 г. вблизи Сингапура потерпел аварию танкер «Evoikos» и в море поступило 30 тыс. тонн мазута. Под влиянием сильных приливных течений нефтяные пленки, эмульсии и агрегаты в течение двух месяцев дрейфовали на акватории Малаккского пролива с площадью нефтяного покрытия более 3 тыс. км<sup>2</sup>. Выбросы нефти на берег были относительно невелики (100 - 200 тонн) и привели к загрязнению 40 км побережья Малайзии на расстоянии около 300 км от места разлива.

- При аварии российского танкера «Находка» в 1997 году в 100 км от берегов Японии произошел разлив около 6000 тонн тяжелого мазута. В результате штормовой погоды и сильных течений разлившаяся нефть в виде пятен эмульсии размером от 1 до 100 м была

рассеяна на большой акватории и вынесена на берег острова Оки (Япония). По разным оценкам, нефтяному загрязнению подверглась береговая полоса протяженностью от 1000 до 2000 км.

- После разлива в 1991 году в Карибском море 1700 тонн тяжелого мазута нефтяные остатки в течение месяца выбрасывались на берега островов пяти стран Карибского бассейна.

Как отмечено выше, тяжелые типы нефти имеют удельный вес близкий к единице. По мере выветривания их плотность повышается и может превосходить плотность морской воды. По этой причине они часто дрейфуют в подтопленном состоянии чуть ниже поверхности моря. При сильном волнении нефтяные фрагменты с нулевой и даже небольшой положительной плавучестью не плавают по поверхности моря, а захлестываются волнами и вовлекаются в их орбитальное движение и таким образом большую часть времени находятся ниже поверхности моря. Контролировать перемещение таких разливов очень трудно, а в большинстве случаев практически невозможно при любых способах визуального наблюдения.

Так произошло при разливе тяжелой бункерной нефти в результате аварии баржи «Nestucca» у берегов США (штат Вашингтон). Вылившийся на поверхность моря тяжелый мазут (около 750 тонн) быстро трансформировался в обширное поле вязких нефтяных агрегатов с нейтральной плавучестью. Эти агрегаты исчезли из поля зрения наблюдателей и появились лишь спустя неделю на расстоянии 180 км к северу от места разлива у берегов острова Ванкувер (Канада). После этого в течение месяца продолжались выбросы нефтяных остатков на побережье этого и других островов у берегов Британской Колумбии. Около 150 км береговой линии оказались загрязненными в той или иной степени, а популяциям местной орнитофауны был нанесен значительный ущерб.

Сходным образом развивались события после разлива около 2400 тонн тяжелого мазута при посадке на мель нефтяной баржи «Morris J. Vermann» у берегов Пуэрто-Рико в 1994 году. Уже в первые сутки после разлива нефть находилась не только на поверхности моря, но и в подводном положении в виде плавающих нефтяных скоплений (матов) полужидкой консистенции. Основная масса этих подводных скоплений локализовалась на дне в пределах нескольких километров от места аварии, однако отдельные фрагменты были обнаружены на расстоянии 110 км от этого места.

Часть нефти после разлива была вынесена в прибойную зону и, смешавшись здесь с песком, образовала тяжелые вязкие агрегаты, которые были распределены преимущественно на дне прибрежной зоны. При сильном волнении часть нефти освобождалась от примеси песка, всплывала на поверхность моря и выносилась на берег.

Как отмечалось выше, плотность тяжелых типов нефти ненамного превосходит плотность морской воды, и потому быстрое и прямое выведение нефти из водной толи на дно наблюдалось весьма редко. Подобные сценарии наиболее вероятны в обстановке мелководных, защищенных от прямого действия волн и течений участков побережья. Один из немногих случаев такого рода возник при взрыве и пожаре вовремя загрузки танкера «Sansinella» в гавани Лос-Анжелеса. Более 4000 тонн тяжелой бункерной нефти быстро опустились на дно и образовали скопления загустевшей вязкой нефти в виде протяженных матов толщиной до 3 м. Благодаря слабым течениям нефть оставалась в основном на дне в районе разлива. Очистные работы продолжались около 1,5 лет.

Необычная ситуация сложилась на атлантическом шельфе Испании, где в ноябре 2002 года потерпел крушение танкер "Prestige" [Rodriquez, 2004; Serrano et al., 2006]. В море вылилось более 60 тысяч тонн тяжелой сырой нефти и мазута, а протяженность загрязненной береговой полосы достигала 3000 км. За счет высокой плотности нефти и ее вязкой консистенции она



быстро выводилась из толщи воды и накапливалась на дне в виде смолистых комков (агрегатов) размером от 1 до 20 см. На отдельных участках Атлантического побережья Испании наблюдались штормовые выносы вязких нефтяных остатков на пологие берега с шириной покрытия пляжей в десятки метров.

Один из инцидентов разлива тяжелой нефти произошел в январе 2004 г. неподалеку от Бергена (Норвегия), где потерпело крушение судно «Rocknes» и в прибрежные воды поступило 180 тонн очень тяжелого и вязкого мазута марки IFO - 380. Почти весь разлившийся мазут был быстро вынесен на скалистые и валунно-галечные берега, которые оказались загрязненными в той или иной степени на протяжении 45 км береговой линии. Очистные работы с применением адсорбентов и промывка каменистых берегов водой под давлением продолжались 6 месяцев и стоили 20 млн евро.

### 6.3. Описание модели SPILLMOD

Модель SPILLMOD, созданная в Государственном океанографическом институте имени Н.Н. Зубова, описывает процессы физико-химической трансформации разлива нефти на поверхности моря. В отличие от многих моделей распространения нефти в море, в которых используются соотношения Фэя, в модели SPILLMOD конфигурация нефтяного загрязнения зависит от гидрометеорологических условий и режима сброса нефти или нефтепродукта. Принципиальным отличием между моделью SPILLMOD и другими моделями заключается в способе расчета площади нефтяного пятна и распределения толщины нефти внутри области нефтяного загрязнения. В основе математической постановки задачи лежат осредненные по вертикальной координате уравнения Навье-Стокса для тонкого слоя легкой жидкости на поверхности более тяжелого субстрата. Особенность постановки и реализации модели SPILLMOD заключается в том, что решение задачи ищется в области, которая сама является искомой величиной. При расчетах распространения нефти от источников, расположенных на морском дне, в модельный комплекс включаются дополнительные модули (i) для описания первоначального диспергирования нефтегазового выброса, (ii) для расчета подъема нефти вверх за счет положительной плавучести газовых пузырьков (режим плавучей струи) и (iii) подъема к поверхности за счет плавучести капель нефти. Последний процесс сопровождается диффузионным рассеянием капель диспергированной нефти и их переносом течениями, главным образом, в верхнем слое океана. Здесь и далее сведения об используемых моделях проводится в соответствии с [Зацепя и др., 2018].

#### 6.3.1. Постановка задачи для расчета распространения нефти по открытой воде

Рассматривается двумерная область  $\Omega(x,y)$  с границей  $d\Omega$ . Нефть или нефтепродукт занимает подобласть  $\Omega' \in \Omega$ . В подобласти  $\Omega'' \in \Omega'$  действует источник, обеспечивая поток нефтепродуктов –  $Q_0$  на поверхность моря. Область  $\Omega$  ограничена кусочно-линейной функцией, аппроксимирующей береговой контур. Основные уравнения модели для области  $\Omega'$  представляются в следующем виде:

$$h \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} \right) = -g' h \nabla h - \frac{\beta}{\rho_{oil}} |(\mathbf{u} - (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c))| (\mathbf{u} - (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c))$$

$$h \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} \right) = -g' h \nabla h - \frac{\beta}{\rho_{oil}} |(\mathbf{u} - (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c))| (\mathbf{u} - (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c)), \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(h\mathbf{u}) = -\frac{Q_e + Q_{n\_d} + Q_{ch\_d} - Q_o + Q_{sc}}{\rho_o}, \quad (6.2)$$

где  $\rho_o$  – плотность нефти,  $u$  – вертикально осредненная скорость движения нефти,  $u_d$  – скорость поверхностного дрейфового течения, задаваемая параметрически;  $u_c$  – скорость течения неветрового происхождения, рассчитанная по модели течений или определенная экспериментальным путем,  $h$  – толщина нефти,  $\beta$  – коэффициент трения,  $Q_e$  – поток массы за счет испарения,  $Q_{n\_d}$  – поток массы за счет естественного диспергирования,  $Q_{ch\_d}$  – поток массы за счет химического диспергирования,  $Q_o$  – поток нефти на поверхность от источника разлива,  $Q_{sc}$  – поток нефти с поверхности за счет применения скиммерных систем,  $g' = g(\rho_w - \rho_{oil})/\rho_w$  – редуцированное ускорение силы тяжести,  $\rho_w$  – плотность воды.

Если граница области  $\Omega'(t,x,y)$  есть  $L(t,x,y)$  и  $L = L_1(t,x,y) \cup L_2(x,y)$ , где  $L_1$  – свободная граница и  $L_2$  – контактная (твердая) граница, система уравнений (6.1)-(6.2) должна быть дополнена следующими граничными условиями:

кинематическое:

$$L_1: B_t + \mathbf{u}\nabla B = 0, \quad (6.3)$$

где  $B(t,x,y) = 0$  – уравнение свободной границы;

и динамическое условие:

$$L_1: h(x,y) = 0 \quad (6.4)$$

Соотношение (6.3) справедливо, когда перемещение границы обусловлено динамическими факторами. В некоторых случаях граница области может изменяться за счет удаления нефти с поверхности как под действием природных факторов – за счет испарения и естественного диспергирования волнами, так и в ходе операций по борьбе с разливом нефти.

На твердой границе  $L_2$  (если таковая присутствует) должно выполняться условие непротекания:

$$L_2: \mathbf{u}_n = 0 \quad (6.5)$$

где  $\mathbf{u}_n$  – нормальная к  $L_2$  компонента  $\mathbf{u}$ .

В начальный момент времени распределение толщины  $h(x,y,0)$ , поле скорости  $u(x,y,0)$  и область  $\Omega'(0)$  предполагаются известными. Требуется определить  $h(x,y,t)$ ,  $u(x,y,t)$  и  $\Omega'(t)$  при  $t > 0$ .

Постановку задачи необходимо дополнить параметризациями потоков нефти с поверхности моря за счет процессов испарения и диспергирования, притока нефти на поверхность от подводного источника и источника на поверхности моря, изменения плотности, вязкости и межфазного натяжения нефти из-за выветривания.

Для расчета потока нефти за счет диспергирования ветровыми волнами в модели SPILLMOD используется система расчетных соотношений, физический смысл которых подробно описан в статьях авторов [Зацена и др., 2018b; Зацена и др., 2018c]

$$Q_{n\_d} = \begin{cases} \rho_{oil} TOR \cdot h_{oil} \cdot F_{up}(d_{50}^N) \cdot F_m(d_{max}, v_d), h_{oil} \geq h_T \\ \rho_{oil} TOR \cdot h_T, h_{oil} < h_T, \end{cases} \quad (6.6)$$

где  $TOR \approx 1.4 \cdot 10^{-2} u_*^3 g c_T^{-4}$ ,  $c_T$  – пороговая фазовая скорость волн, при которой начинается обрушение,  $u_*$  – динамическая скорость в приводном слое атмосферы,  $h_T$  – пороговая толщина нефти на поверхности моря, при достижении которой капли нефти при проникновении в водную толщу уже не возвращаются к поверхности.

Медиана распределения капель нефти по размерам при дроблении в слое волнового перемешивания  $d_{50}^N$  определяется физическими свойствами нефти, толщиной пленки на поверхности и скоростью ветра

$$d_{50}^N = A \frac{h_{oil}^{0.4} \sigma_{ow}^{0.6}}{\rho_{oil}^{0.6}} \frac{1 + 0.02 (\mu_{oil} W_{10} / \sigma)^{0.6}}{0.57 \cdot W_{10}^{1.2}}, \quad (6.7)$$

Корректирующий множитель в соотношении (6.6)  $F_{up}(d_{50}^N)$  определяет долю нефти, возвращающуюся к поверхности между последовательными обрушениями волн.

$$F_{up}(d_{50}^N) = \left( 1 - K_{up} \frac{1}{W_{cr}} k_{St} (d_{50}^N)^2 \right), \quad (6.8)$$

где  $K_{up} = \left( e^{3S^2} \right)^2 \int_0^{e^{3(S-S^2)}} \zeta^2 f_{norm}(1, S, \zeta) d\zeta$ ,  $f_{norm}(1, S, d)$  – логнормальное распределение

для размеров капель, нормированных на  $d_{50}^V$  – медианный диаметр распределения объема нефти по размерам капель, коэффициент  $k_{St} = -\frac{g'}{18v_w}$ .

Множитель  $F_m(d_{max}, v_d)$  определяет долю капель, не возвращающихся к поверхности за счет турбулентной диффузии,

$$F_m(d_{max}, v_d) = v_d \int_0^{d_{max}} \frac{f_V(d')}{W_d + v_d} dd', \quad (6.9)$$

где  $v_d = 0.14 v_w^*$ ,  $v_w^*$  – динамическая скорость в воде, максимальный размер капель при диспергировании волнами  $d_{max}^N = d_{50}^N \cdot e^{3S}$ ,  $S$  – дисперсия логнормального распределения,  $f_V(\zeta)$  – функция плотности распределения объема нефти по размерам капель,  $\zeta$  – диаметр капли нефти.

– где  $v_w^*$  – динамическая скорость в воде,  $Ri$  – число Ричардсона, зависящее от плотностной стратификации в верхнем слое моря,  $f(Ri) = (1 + \alpha Ri^\gamma)^{-\beta}$ ,

$$Ri = \frac{g}{\rho_w} \frac{\partial \rho / \partial z}{(\partial u / \partial z)^2} = N^2 (\partial u / \partial z)^{-2}, \text{ частота Вайсала-Брента.}$$

Плотность и вязкость нефти значительно увеличиваются при испарении легких фракций нефти, при образовании эмульсий "вода в нефти" и зависят от температуры окружающей среды, что особенно важно при расчетах нефтяных разливов в арктических морях.

Расчет испарения из нефтяного пятна основывается на предположении, что нефть или нефтепродукт можно рассматривать как смесь нескольких, как правило, от 8 до 20 фракций или

псевдокомпонент с известными свойствами. Поток массы нефти за счет испарения  $Q_e$  из пятна на поверхности моря представляется как:

$$Q_e = k_e \sum_i \frac{MW_i P_i X_i}{R_g T_{wK}} = \sum_i Q_i, \quad (6.10)$$

где  $k_e$  – эмпирический коэффициент, зависящий от скорости ветра,  $P_i$  – давление насыщенного пара  $i$ -той фракции нефти,  $MW_i$  – молекулярный вес фракции,  $X_i$  – молярная доля фракции,  $R_g$  – универсальная газовая постоянная,  $T_{wK}$  – температура подстилающей поверхности (температура воды) [°K],  $Q_i$  – поток массы  $i$ -той фракции нефти. Если молекулярный вес фракции неизвестен, то он рассчитывается по формуле Воинова

$$MW_i = 60 + 0.3T_{bi} + 0.001T_{bi}^2, \quad (6.11)$$

а давление насыщенного пара по формуле Ашфорта

$$\lg P_i = 2.68 \left[ 1 - \frac{1250 / (\sqrt{T_{wK}^2 + 10800} - 307.6) - 1}{1250 / (\sqrt{T_{bi}^2 + 10800} - 307.6) - 1} \right], \quad (6.12)$$

где  $T_{bi}$  – температура кипения  $i$ -той фракции [°K].

Для эмпирического коэффициента выбрана следующая параметризация

$$k_e = \begin{cases} 0.0018 \cdot W_{10}^{0.78} & W_{10} > 4 \text{ м/с} \\ 0.005 & W_{10} \leq 4 \text{ м/с} \end{cases}. \quad (6.13)$$

В процессе испарения меняется процентное соотношение между фракциями с различными температурами кипения. Как следствие, меняется плотность и вязкость нефти в пятне на поверхности моря.

Для расчета изменений плотности и вязкости нефти применяются соотношения, приведенные в разделе 6.3.2.1.

### 6.3.2. О моделировании распространения разливов нефти в дрейфующем льду

Задачу о распространении по поверхности моря, частично покрытого льдом естественно рассматривать в двух предельных случаях. Если характерный масштаб разлива существенно меньше, чем характерные размеры льдин, что, видимо, может реализоваться возле кромки припая, лёд рассматривается как фиксированная контактная граница, на которой задаются условие непротекания. Уравнения баланса импульса и массы будут иметь вид, аналогичный распространению нефти на открытой воде (6.1) - (6.2), но с некоторой модификацией граничных условий, определяемых конфигурацией ледового массива.

При растекании нефти в разводьях загрязнения льда практически не происходит, т.к. боковая инфильтрация в лед незначительна. Но при сжатии и торошении льда нефть будет заплескиваться как на поверхность льда, так и уходить под ледяной покров.

Другим предельным случаем следует считать ситуацию, когда размеры нефтяного разлива значительно больше характерных размеров льдин. В этом случае уравнения движения для нефти, движущейся в битом льду со сплоченностью  $C_{ice}$ , характерным размером льдин  $d_i$  и занимающей область  $\Omega(t, x, y)$  записываются в виде:

$$h(1-C_{ice})\frac{d\mathbf{u}}{dt} = -g'h\nabla h(1-\sqrt{C_{ice}}) - \frac{C_{ice}}{d}(\mathbf{u}-\mathbf{u}_{ice})|\mathbf{u}-\mathbf{u}_{ice}|h - \frac{\beta}{\rho_{oil}}(\mathbf{u}-\mathbf{u}_c)|\mathbf{u}-\mathbf{u}_c|(1-C_{ice}), \quad (6.1a)$$

$\Omega$ :

$$h_t + \nabla \cdot (h\mathbf{u}) + [hC_{ice} \cdot \nabla \cdot (\mathbf{u}_{ice})]/(1-C_{ice}) = \left[ (Q_e + Q_{n-d})/\rho_{oil} \right] F(C_{ice}) - Q_0/\rho_{oil}(1-C_{ice}), \quad (6.2a)$$

где,  $F(C_{ice})$  – параметр, корректирующий потоки в воду и атмосферу с учетом сплоченности льда. Третий член в левой части уравнения (6.2a) учитывает изменение толщины нефти за счёт дивергенции скорости льда, приводящей к изменению его сплоченности.

При вышеуказанной параметризации действующих сил со стороны льдин задача требует формулировки граничных условий на «свободной» границе, аналогично (6.1)–(6.2).

Для исследования свойств решения упростим задачу и рассмотрим растекание нефти на неподвижной поверхности воды с битым льдом. Выветриванием нефти пренебрежем для простоты. Уравнения движения для нефти, движущейся в неподвижном битом льду:

$$h(1-C_{ice})\frac{d\mathbf{u}}{dt} = -g'h\nabla h(1-\sqrt{C_{ice}}) - \frac{C_{ice}}{d}\mathbf{u}|\mathbf{u}|h - \frac{\beta}{\rho_{oil}}\mathbf{u}|\mathbf{u}|(1-C_{ice}), \quad (6.1b)$$

$$h_t + \nabla \cdot (h\mathbf{u}) = 0. \quad (6.2b)$$

В случае радиально-симметричного растекания (идеализированный случай) уравнение (6.1b) можно редуцировать для получения простых асимптотических соотношений. Пренебрегая инерционными членами, получим

$$g'\frac{\partial h}{\partial r}\frac{1}{1+\sqrt{C}} = \underbrace{u^2\frac{C}{d(1-C)}}_I + \underbrace{u^2\frac{\beta}{\rho_{oil}h}}_{II}. \quad (6.15)$$

В правой части (6.15) две силы сопротивления – сопротивление движению нефти ансамбля льдин (I) и второй член (II) – «традиционное» трение нефти о воду.

Если объем пролитой нефти  $V_{oil}$ , то оценка средней толщины нефти в каждый момент времени  $H = \frac{V_{oil}}{\pi R^2(1-C)}$ , где  $R$  – радиус пятна нефти.

При большой толщине нефти, когда сопротивление (I) больше (II), асимптотический режим определится из соотношения

$$g'\frac{\partial h}{\partial x}\frac{1}{1+\sqrt{C}} = u^2\frac{C}{d(1-C)}, \quad (6.16)$$

$$R^5 = \frac{\Omega g' d}{\pi C(1+\sqrt{C})} t^2. \quad (6.17)$$

Когда толщина нефти будет уменьшаться, наступит другой асимптотический режим

$$g'\frac{\partial h}{\partial x}\frac{1}{1+\sqrt{C}} = u^2\frac{\beta}{\rho_{oil}h}, \quad (6.18)$$

$$R^7 = \rho_{oil} g' \frac{\Omega^2}{\pi^2 \beta} \frac{1}{(1-C)^2(1+\sqrt{C})} t^2. \quad (6.19)$$

Итак:

для большой толщины нефти 
$$R^5 = \frac{\Omega g' d}{\pi C (1 + \sqrt{C})} t^2, \quad (6.20)$$

для малых толщин 
$$R^7 = \rho_{oil} g' \frac{\Omega^2}{\pi^2 \beta} \frac{1}{(1-C)^2 (1+\sqrt{C})} t^2. \quad (6.21)$$

Анализ уже произошедших аварийных ситуаций, связанных с проливом нефти в морскую среду в зимних условиях, показывает, что нефть часто попадает в ледовый канал, по которому происходит движение танкеров, заполненный мелкобитым льдом. Важным представляется и тот факт, что размеры льдин в канале значительно меньше, чем в окружающих канал ледовых полях.

### 6.3.2.1. Процессы выветривания и изменение физических свойств нефти

Плотность и вязкость нефти значительно увеличиваются при испарении легких фракций нефти, при образовании эмульсий "вода в нефти" и зависят от температуры окружающей среды, что особенно важно при расчетах нефтяных разливов в арктических морях.

Для расчета изменений плотности и вязкости нефти применяются соотношения:

$$\rho_{oil} = F_{em} \rho_w + \rho_{oil}^{(0)} (1 - F_{em}) (1 + c_{ev} F_{ev}) [1 - c_T (T_{wk} - T_{OK})] \quad (6.22)$$

Изменение вязкости за счет температуры

$$\mu_{oil} = \mu_{oil}^{(0)} \exp \left[ a_T (1/T_{wk} - 1/T_{OK}) \right] \quad (6.23)$$

Изменение вязкости за счет испарения

$$\mu_{oil} = \mu_{oil}^{(0)} \exp(a_{ev} F_{ev}) \quad (6.24)$$

Изменение вязкости за счет эмульгирования

$$\mu_{em} = \mu_{oil}^{(0)} \exp \left( \frac{a_1 F_{em}}{1 - a_2 F_{em}} \right) \quad (6.25)$$

где  $\rho_{oil}^{(0)}$  – начальная плотность нефти,  $\mu_{oil}^{(0)}$  – начальная вязкость нефти,  $T_{OK}$  – относительная (или предыдущая) температура воды,  $F_{ev}$  – массовая доля испарившейся нефти,  $F_{em}$  – объемная доля воды в эмульсии,  $c_{ev}$ ,  $c_T$ ,  $a_T$ ,  $a_{ev}$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  – эмпирические коэффициенты. По данным, приведенным в работе [Нельсон-Смит, 1977], коэффициент  $c_{ev}=0.14 - 0.25$ . В статье [Belore and Buist, 1994] приводятся результаты анализа для 13 сортов сырой нефти и показано, что коэффициент  $a_T$  изменяется в пределах от 1085 до 17838, коэффициент  $a_{ev}$  изменяется в пределах от 2.8 до 16.95.

Вместо инженерного подхода для расчета изменения плотности за счет испарения легких фракций (6.19) можно пересчитать плотность смеси по известной плотности узких фракций. Приведем полезные для дальнейшего изложения соотношения, связывающие  $X_i$ ,  $C_i^m$ ,  $C_i$  – мольную, массовую и объемную концентрации компонентов смеси:

$$X_i = N_i / \sum_{k=1}^{N_f} N_k, \quad (6.26)$$

$$C_i^m = m_i / \sum_{k=1}^{N_f} m_k, \quad (6.27)$$

$$C_i^m = X_i M_i / M_0, \quad (6.28)$$

$$C_i = \rho_{oil} X_i M_i / M_0, \quad (6.29)$$

$$M_0 = \sum_{k=1}^{N_f} m_k / \sum_{k=1}^{N_f} N_k, \quad (6.30)$$

где  $N_i$ ,  $m_i$  – количество молей и масса  $i$ -того псевдокомпонента,  $M_i$  – молекулярная масса  $i$ -того псевдокомпонента,  $M_0$  – средняя молекулярная масса смеси (нефти),  $\rho_{oil}$  – плотность нефти.

Изменение массы псевдокомпонента за счет испарения приводит к изменению суммарного объема смеси  $V = \sum_{i=1}^{N_f} V_i$ , принимая что объем отдельного компонента

рассчитывается по соотношению  $V_i(t) = \frac{m_i(t)}{\rho_i}$ , а общая масса в разливе равна  $m_{oil}(t) = \sum_{i=1}^{N_f} m_i(t)$ .

Таким образом, с учетом (4.15) можно рассчитать изменение плотности исходной нефти. Как было исследовано в [Зацева и др., 2020] изменение фракционного состава за счет испарения существенно зависит от толщины слоя нефти. Тонкие слои нефти или нефтепродукта эволюционируют значительно быстрее относительно толстых слоев. Диспергирование приводит к уменьшению толщины слоя нефти на поверхности и, как следствие, ускоряются процессы изменения содержания фракций, приводящие к увеличению плотности выветрившейся нефти.

Как было указано выше, основным процессом, от которого зависит судьба нефти в море, является растекание. Растекание нефти по поверхности моря сопровождается процессами выветривания – испарением или переходом части нефти в загрязнение атмосферы и естественным диспергированием – удалением нефти с поверхности за счет разрушения волнами и переходом в водную толщу в виде мелких капель. Удаление из нефти легких фракций приводит к изменению плотности и вязкости нефти на поверхности моря. Более сильным механизмом увеличения вязкости нефти на поверхности является процесс образования эмульсии типа вода-в-нефти, за счет которого вязкость исходной нефти может увеличиться на несколько порядков.

Увеличение вязкости нефти приводит к тому, что существенно затрудняется естественное диспергирование пленки нефти в капли.

### 6.3.2.2. Особенности распространения нефти с высокой температурой текучести

Для нефтепродуктов с высокой температурой текучести, при достижении которой он практически теряет свои текучие свойства и растекание прекращается, дальнейшее распространение по поверхности воды происходит в основном вследствие горизонтальной

турбулентной диффузии, что необходимо учитывать в модели для получения правильных оценок геометрических размеров нефтяного загрязнения.

В зависимости от сезона, при разливе из подводного участка трубопровода возможны сценарии распространения как по свободной поверхности воды, так и под сплошным или битым льдом, при этом динамика распространения нефти и её теплообмена с окружающей средой будут существенно отличаться.

Задача о влиянии вязкости нефти на процесс растекания тесно связана с изменением температуры нефти на поверхности воды. Поскольку, как правило, перегрузка нефтепродуктов с высокой вязкостью (некоторых видов сырой нефти, мазута и т. д.) производится в подогретом до температуры 60-80<sup>0</sup>С состоянии, скорость их распространения в случае аварийного пролива в воду в значительной степени будет определяться скоростью остывания.

Зависимость вязкости нефти от температуры описывается эмпирической формулой Вальтера  $\lg[\lg(v_t + 0.7)] = A - B \lg T$ .

Для определения параметров А и В используются значения вязкости, измеренные при двух различных температурах. Эти соотношения, хотя и упрощённые, отражают основную особенность температурной зависимости вязкости многих типов нефти. Для нефти с высоким содержанием парафинов даже при температурах выше 0<sup>0</sup>С эти соотношения перестают выполняться, более того, нефть приобретает неньютоновские свойства, т. е. свойства бингамовской жидкости с некоторым порогом текучести, также зависящим от температуры.

В случае высокопарафинистой нефти, при температурах близких к температуре застывания нефть полностью теряет текучесть. В случае растекания по, или под твёрдой поверхностью, например, под сплошным льдом, это будет означать прекращение растекания. При распространении по свободной поверхности воды, это приводит к прекращению гравитационного растекания, и дальнейшему распространению за счёт турбулентной диффузии.

По данным Заказчика ООО «Варандейский терминал» температура перекачки нефти по трубопроводу до 55 <sup>0</sup>С, температура застывания нефти от 18 до 22 <sup>0</sup>С.

Учитывая, что вязкая нефть при растекании по поверхности воды имеет тенденцию образовывать ровную, «столообразную» поверхность, и при свободном растекании малоподвижна относительно верхнего слоя воды, можно рассмотреть одномерную задачу теплообмена ограниченного слоя жидкости, находящегося на поверхности полуограниченного слоя другой жидкости (считая, что глубина значительно превышает толщину нефти).

Время, необходимое для остывания нефтепродукта, можно приближённо оценить, если рассматривать сопряжённую задачу теплопроводности, в которой две области  $V_1$  и  $V_2$ , ограниченная и полуограниченная, заполнены разными жидкостями, и имеют общую границу S. Распределения температур  $T_1 = T_1(x, t)$  в области  $0 \leq x \leq h$  и  $T_2 = T_2(x, t)$  в области  $h \leq x \leq \infty$  описываются уравнениями теплопроводности соответственно

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \quad \text{для} \quad 0 \leq x \leq h \quad (6.31)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \quad \text{для} \quad h \leq x \leq \infty \quad (6.32)$$



где  $\alpha_1, \alpha_2$  - коэффициенты теплообмена,  $T_1, T_2$  - температура в слое нефти и воды соответственно.

Нефть в начальный момент  $t = 0$  имеет температуру  $T_0$ , а вода –  $T_{0w}$ , которую без потери общности можно считать нулевой, на границе  $x = h$  заданы сопряжённые граничные условия, на бесконечности температура считается нулевой, а на свободной границе нефти ( $x = 0$ ) поддерживается постоянная температура  $T_s$ :

$$\begin{aligned} T_1 &= T_0 && \text{при } t = 0 \\ T_2 &= 0 && \text{при } t = 0 \\ T_1 &= T_2 && \text{при } x = h \\ \lambda_1 \partial_x T_1 &= \lambda_2 \partial_x T_2 && \text{при } x = h \\ T_1 &= T_s && \text{при } x = 0 \\ T_2 &\rightarrow 0 && \text{при } x \rightarrow \infty \end{aligned}$$

$$T_1 = T_0 \quad \text{при } t = 0$$

В этих условиях задача имеет решение (Лыков, 1967):

$$\begin{aligned} \frac{T_1(x,t) - T_0}{T_s - T_0} &= \operatorname{Erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_1 t}}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} h^n \left[ \operatorname{Erfc}\left(\frac{2nl+x}{2\sqrt{\alpha_1 t}}\right) - \operatorname{Erfc}\left(\frac{2nl-x}{2\sqrt{\alpha_1 t}}\right) \right] + \\ &\frac{T_0}{(1+K)(T_s - T_0)} \sum_{n=1}^{\infty} h^{n-1} \left[ \operatorname{Erfc}\left(\frac{2nl-l+x}{2\sqrt{\alpha_1 t}}\right) - \operatorname{Erfc}\left(\frac{2nl-l-x}{2\sqrt{\alpha_1 t}}\right) \right] \end{aligned} \quad (6.33)$$

$$\begin{aligned} \frac{T_2(x,t)}{T_s - T_0} &= \frac{K}{1+K} \left[ \frac{T_0}{T_s - T_0} \operatorname{Erfc}\left(\frac{x-l}{2\sqrt{\alpha_2 t}}\right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} h^{n-1} \operatorname{Erfc}\left(\frac{(2n-1)M+x-l}{2\sqrt{\alpha_2 t}}\right) \right] + \\ &\frac{2KT_0}{(1+K)^2 (T_s - T_0)} \sum_{n=1}^{\infty} h^{n-1} \operatorname{Erfc}\left(\frac{2nM-l+x}{2\sqrt{\alpha_1 t}}\right) \end{aligned} \quad (6.34)$$

где

$$h = \frac{1-K}{1+K} \quad K = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}}, \quad M = l \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}}, \quad (6.35)$$

$\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности нефти и воды соответственно,

$\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты температуропроводности.

Ниже приведены примеры расчёта изменения температуры в слое нефти и воды, при начальной температуре нефти  $T_0 = 55^\circ\text{C}$ , воды  $0^\circ\text{C}$ , и постоянной толщине слоя нефти  $l=3\text{см}$  (Рисунок 6.3а) и 1 см (Рисунок 6.3б). Остальные параметры были выбраны следующими:

$$\alpha_1 = 0.92 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}, \text{ нефть}$$

$$\alpha_2 = 1.4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}, \text{ вода}$$

$$\lambda_1 = 1.69 \cdot 10^{-3} \text{ дж/см}\cdot\text{сек}\cdot\text{град.} = 0.169 \text{ Вт/м }^\circ\text{К} \text{ (Нефть)}$$

$$\lambda_2 = 5.6 \cdot 10^{-3} \text{ дж/см}\cdot\text{сек}\cdot\text{град.} = 0.56 \text{ Вт/м }^\circ\text{К} \text{ (Вода)}$$

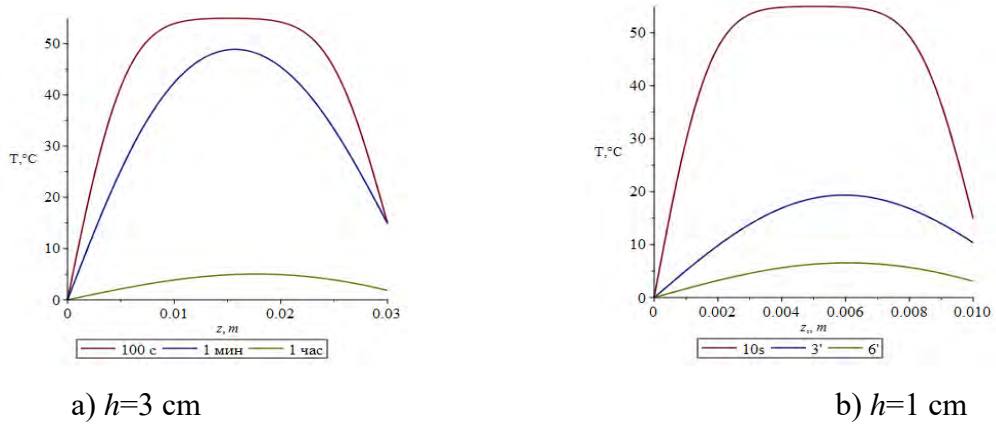


Рисунок 6.3. Изменение температуры слоя нефти толщиной 3 см и 1 см при начальной температуре  $55^\circ\text{C}$  и температуре воды и воздуха  $0^\circ\text{C}$

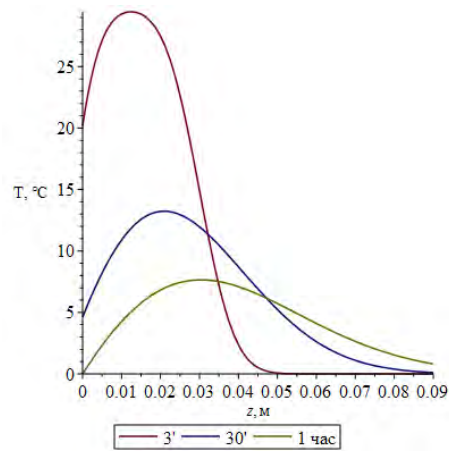


Рисунок 6.4. Изменение температуры в верхнем слое воды при толщине нефти 3 см при начальной температуре  $55^\circ\text{C}$  и начальной температуре воды и воздуха  $0^\circ\text{C}$

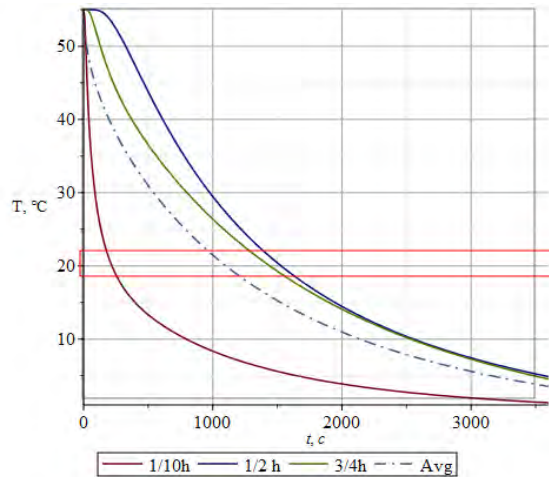


Рисунок 6.5. Изменение температуры нефтепродукта на расстояниях  $0.1, 0.5$  и  $0.75 h$  от поверхности воды при толщине слоя нефти  $h=30 \text{ mm}$ , при  $T_0=55^\circ\text{C}$ . Красными линиями показан диапазон температуры текучести.

Из Рисунка 6.3 видно, что при толщине слоя нефти 3 см время его остывания до точки текучести ( $18-22^\circ\text{C}$ ) составляет в среднем 15–20 минут, при этом медленнее остывает средний слой (25–30 минут). При уменьшении толщины нефти до 1 см время остывания уменьшается до 3–4 минут (Рисунок 6.3б).

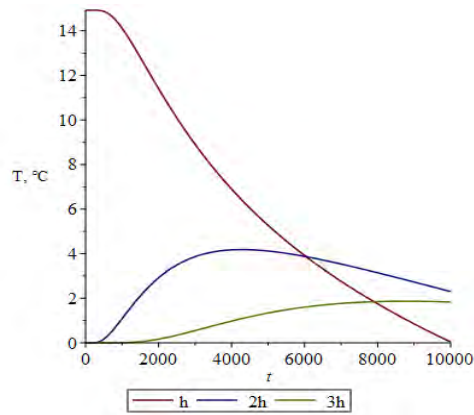


Рисунок 6.6. Изменение температуры воды на расстояниях  $h$  и  $2h$  и  $3h$  от поверхности при толщине слоя нефти  $h=3$  см.

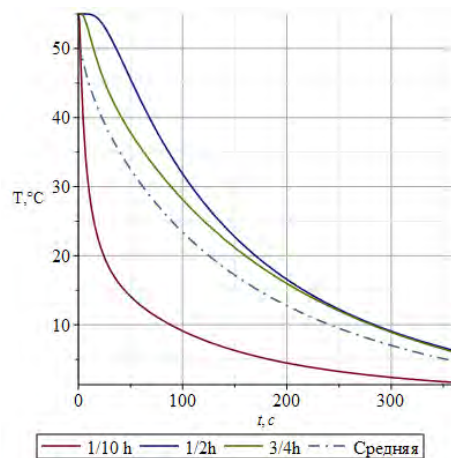


Рисунок 6.7. Изменение температуры нефти на расстояниях  $0.1$ ,  $0.5$  и  $0.75 h$  от поверхности воды при толщине слоя нефти  $h=10$  мм, при  $T_0=55^\circ\text{C}$

В реальных сценариях разливов время достижения температуры текучести может меняться в значительных пределах. Как показали предварительные расчёты, при температуре окружающей воды  $5^\circ\text{C}$ , типичной для летнего сезона, для сценария 1 это время оценивается в пределах 1 часа, для сценария 2 - порядка 11 часов, для сценария 3 – 10 часов (Рисунок 6.8). В сценариях 1 и 2 начальная температура нефти задавалась равной  $55^\circ\text{C}$ , для сценария 3 -  $29^\circ\text{C}$ . Очевидна зависимость скорости остывания нефти от объёма разлива, температуры нефти и окружающей среды, в некоторой степени скорости ветра, размеров и конфигурации разлива. Однако процесс растекания остывающей нефти будет зависеть также от состояния пограничных слоёв воды и воздуха, скорости испарения, и ряда других факторов.

В этих расчётах учитывалось изменение средней по толщине температуры нефти, при этом, как показано выше, изменения температуры и, следовательно, вязкости на верхней и нижней границе слика могут существенно отличаться от средних значений, и ограничить, или полностью остановить растекание нефти. Можно предположить, что нефть будет застывать неравномерно, образуя на поверхности пленку, которая может оказывать большое сопротивление растеканию.

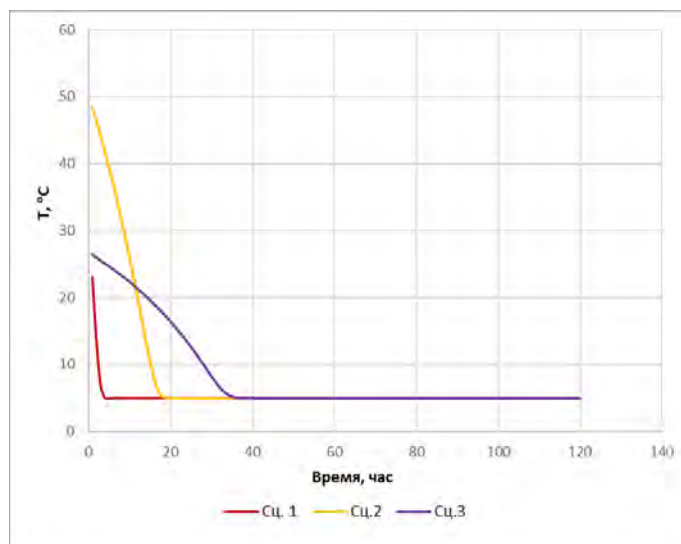


Рисунок 6.8. Изменение средней температуры нефти в сценариях 1–3 при температуре окружающей воды 5°C

При растекании *под сплошным льдом* нефть находится между полуограниченным слоем воды и твёрдой поверхностью.

Для получения оценок распространения парафинистой нефти под сплошным льдом необходимо рассмотреть следующие составляющие (стадии) процесса:

- теплообмен с окружающей водой и растекание жидкой нефти под поверхностью льда с учётом увеличения вязкости при остывании нефти
- теплообмен и плавление нижней поверхности льда
- кристаллизация парафинов при остывании нефти
- теплообмен нефти в твёрдом состоянии со льдом и окружающей водой

Это достаточно сложная гидротермодинамическая задача, решение которой возможно численными методами. Вместе с тем можно попытаться получить приближённые оценки величин, рассмотрев равновесное состояние.

При разливе *под поверхность льда* геометрические характеристики нефтяного загрязнения в большой степени зависят от морфологии нижней поверхности льда, которая наиболее неоднородна в конце ледового сезона и практически горизонтальна в случае молодого льда. При разливе под гладким льдом нефть будет растекаться до некоторой минимальной толщины, порядка 0.5–1 см, более точно определяемой балансом сил плавучести и межфазного натяжения, исходя из которого можно определить характерные размеры образующегося загрязнения [Konno and Izumiyama, 2002].

В случае продолжительного источника размер подлёдного загрязнения будет расти со скоростью, зависящей от интенсивности источника, параметров нефти и шероховатости нижней поверхности льда. Асимптотическую оценку характерных размеров в этом случае можно получить, исходя из рассмотрения баланса основных действующих сил.

При постоянном расходе (притоке) нефти радиус будет постоянно увеличиваться. Если исключить из рассмотрения силу поверхностного натяжения, для гравитационно-вязкого растекания при постоянном расходе (притоке) нефти можно получить известное соотношение [Izumiya, 1998]

$$R(t) = k_0 \left( \left( \frac{\rho_{oil} g Q^3}{\pi^3 \mu_{oil}} \right)^{\frac{1}{8}} - 2^{\frac{1}{4}} \left( \frac{Q \sigma_{ow}}{\pi \mu_{oil}} \right)^{\frac{1}{4}} \right) \sqrt{t} \quad (6.36)$$

Таким образом, длительный разлив под сплошным льдом, в отличие от мгновенного, будет растекаться всё время действия источника  $Q$ , после прекращения истечения – до равновесной толщины.

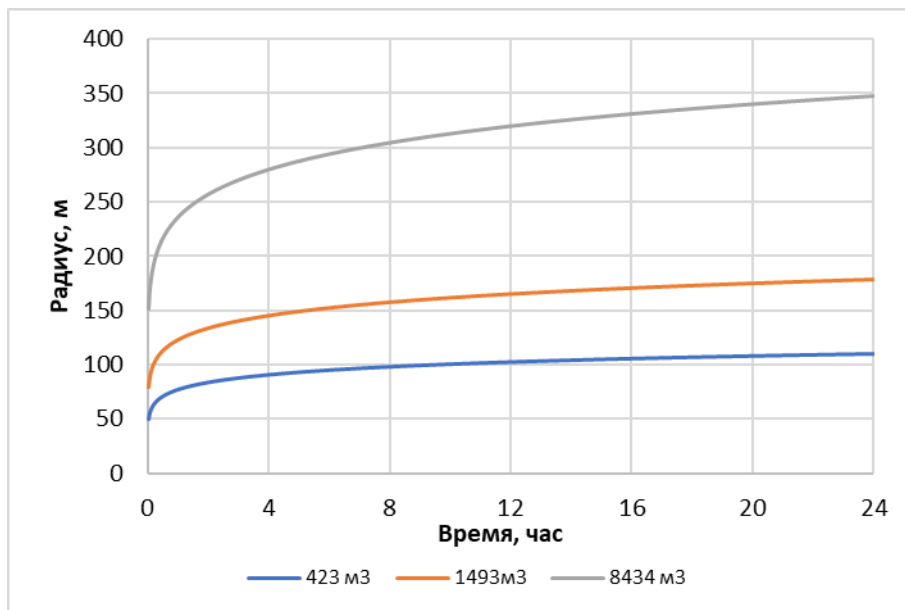


Рис. 1 Радиусы для сценариев 1–3 при разливе под сплошным льдом

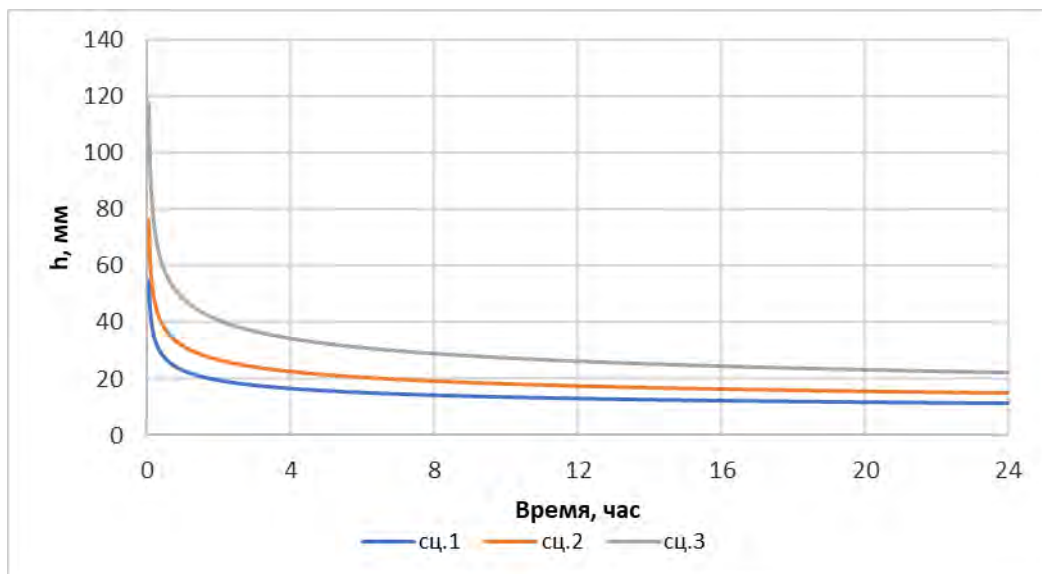


Рис. 2 Средняя толщина разлива для сценариев 1–3.

Можно предположить, что из-за высокой удельной теплоты плавления льда большая часть количества теплоты нагретой нефти израсходуется на нагревание льда и превращение некоторого (относительно небольшого) количества нижней поверхности льда в воду, а именно:

$$Q_o = c_1 m_i (t_0 - t_1) + m_i \lambda + Q_w$$

где  $Q_o = c_0 m_o$  - тепло, отдаваемое при охлаждении нефти,

$c_0$  – теплоёмкость нефти,

$m_o$  – масса нефти,

$Q_w$  – теплота затраченная на нагревание окружающей воды,

$c_1$  – удельная теплоёмкость льда,  $\lambda$ - удельная теплота плавления льда

$t_1 = -1.5$  °C

Если пренебречь теплом, расходуемым на нагрев окружающей воды и, зная равновесный радиус растекания нефти, можно приближённо оценить толщину растаявшего льда. Для сценария 1 и 2 это будет около 7.3 и 7.6 мм соответственно. Для сценария 3 эта толщина будет порядка 11 мм, т.е. пролитая нефть вряд ли будет способна растопить сколько-нибудь сформировавшийся лёд на всю толщину. Также следует заметить, что при существенной неровности нижней поверхности льда локальные толщины нефти могут значительно превышать средние значения, что может привести к протаиванию льда.

При соответствующих условиях, после остывания нефти будет происходить замерзание нового льда, в результате линза нефти окажется вмороженной в лёд и, если нефть остаётся в текучем состоянии, рано или поздно окажется на поверхности, благодаря наличию солевых каналов, по которым нефть может мигрировать. Этот процесс значительно ускоряется во время периода таяния. Парафинистая нефть, по всей вероятности, способна быть надолго законсервированной льдом, и появляться на поверхности только в период весенне-летнего таяния.

Рисунок 6.9. Средняя толщина разлива для сценариев 1–3.

Использованные константы

$c_1$  – удельная теплоемкость льда,  $c_1 = 2,1 \cdot 10^3$  Дж/кг·К;

$\lambda$  – удельная теплота плавления,  $\lambda = 335 \cdot 10^3$  Дж/кг;

$c$  – теплоемкость воды,  $c = 4,19 \cdot 10^3$  Дж/кг·К.

$c_o$  - теплоёмкость нефти

$c_o = 880$  Дж/кг·К

## 6.4. Характеристика гидрометеорологических условий Печорского моря

Варандейский нефтеотгрузочный терминал (ВНОТ) находится в южной части Печорского моря, на расстоянии 23 км к северу от полуострова Варандей. Печорское море – часть юго-восточной области Баренцева моря. Границы Печорского моря показаны на Рисунке 6.10.



Рисунок 6.10. Границы Печорского моря

### 6.4.1. Ледовые условия

Источники данных о состоянии ледового покрова Печорского моря разнообразны: судовые наблюдения, авиационные ледовые разведки, наблюдения на гидрометеорологических станциях (ряды данных продолжительностью от 40 до 100 лет) [Изменчивость природных условий..., 2004], спутниковые данные. В Таблице 10.1 приведены среднемноголетние данные о ледовом покрове в Печорском море [Комплексные ледовые исследования..., 2004]:

Таблица 6.1. Среднемноголетние сведения о ледовом покрове в Печорском море

Показатели	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII
Вероятность наличия, % (ср./макс)	2/100	45/100	93/100	100/100	100/100	100/100	97/100	83/100	63/100	13/100
Ледовитость, % (ср./макс)	-/15	7/34	26/63	44/70	59/99	65/99	74/100	56/100	28/93	6/58
Сплоченность, балл (ср./макс)	9/10	9/10	10/10	10/10	10/10	10/10	9,5/10	8/10	7,5/10	3,5/10
Торосистость, балл (ср./макс)	-/-	1/1,5	1,5/2	2/3	2,5/3,5-4	3/4-4,5	3/5	2,5/3	2/-	1/-

Диапазон сроков замерзания юго-восточной части Баренцева моря составляет 2-3 месяца, а диапазон возможного очищения - около 3 месяцев. При благоприятных условиях ледовый период составляет всего 3-4 месяца, а безледный – 8-9 месяцев. При неблагоприятных условиях продолжительность этих периодов 10-11 и 1-2 месяца соответственно.

Для Варандейского берега в течение первой половины зимы характерно неустойчивое состояние припая, состоящего из льда толщиной 0,2-0,3 м, который может взламываться несколько раз под влиянием зыби, прилива и штормового ветра. При средних условиях устойчивое становление припая происходит в конце февраля – марте, когда лед достигает толщины 0,5-0,7 м. Размах межгодовых изменений превышает 3 месяца. Обычно припай распространяется вдоль берега узкой зоной 2-5 км, но в суровые зимы, при удалении кромки льдов на запад, его ширина может достигать 10-15 км. Изолиния 100 % повторяемости наличия припая примерно совпадает с положением изобаты 5 м, а при наличии островов частично совпадает с изобатой 10 м.

По мере замерзания акватории, обычно в ноябре-марте, кромка льдов перемещается в западном направлении примерно на 800 км. При среднемноголетних условиях крайнее западное положение кромки льдов достигается в первой половине апреля. При средних условиях кромка проходит по линии от 40° до 48° в.д. на северной границе юго-восточной части Баренцева моря, при тяжелых условиях кромка льдов выходит за пределы юго-восточной части Баренцева моря.

По мере очищения моря, обычно в мае-июне, кромка перемещается в восточном направлении. К середине июля, при легких условиях, вся акватория моря очищается от льдов, а при средних условиях кромка льдов находится в крайней восточной части акватории, примыкая к проливу Карские Ворота. При тяжелых условиях кромка льдов простирается от Новой Земли до Варандейского берега и окончательное очищение происходит только в августе.

Сплоченность ледового покрова юго-восточной части Баренцева моря с декабря по апрель обычно составляет 9 - 10 баллов, однако ледовый покров обычно не занимает всей акватории, парциальная площадь сплоченных льдов 7-10 баллов в течение ледового периода постоянно увеличивается, достигая 70 % в апреле.

При среднемноголетних условиях наиболее значительные уменьшения площади льдов различных градаций сплоченности происходит во второй половине мая – первой половине июня. В мае обычно половина моря свободна от льдов, значительные зоны разреженных и редких льдов занимают примерно 10 % площади моря, а парциальная площадь сплоченных льдов 7-10 баллов занимает около 40 %. В июне преобладают разреженные и редкие льды, сплоченные льды сохраняются в виде небольших зон в центральной или юго-восточной частях акватории. В первой половине июля остаются только отдельные небольшие зоны разреженных и редких льдов. В весенне-летний период сплоченность льдов в юго-восточной части Баренцева моря имеет значительные межгодовые изменения. Наибольшая межгодовая изменчивость сплоченности льдов проявляется в мае. Данные о ледовитости Печорского моря приведены в Таблице 10.2 [Иванов, Лебедев, 2004]

Таблица 6.2. Ледовитость юго-восточной части Баренцева моря за 1996 - 2003 гг., %

Год	Месяц									Среднее		Год
	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	XI-III	IV-VII	
1996/97	3	6	40	70	82	88	55	5	0	40	37	38
1997/98	7	44	66	88	93	87	77	40	13	60	54	57
1998/99	58	71	86	97	91	88	77	50	5	81	55	68
1999/00	26	19	67	60	68	53	22	<1	0	48	19	34
2000/01	11	34	39	70	85	64	31	13	<1	48	24	36
2001/02	46	36	57	82	73	62	42	16	1	45	30	38
2002/03	22	41	59	53	56	40	34	16	-	46	23	34

При экстремально легких условиях в середине мая площадь моря, занятая ледяным покровом, состоящем в основном из сплоченных льдов 7-10 баллов, составляет около 30 %.



Разреженные и редкие льды сохраняются в виде отдельных зон, парциальная площадь которых менее 5 %. Примерно 70 % площади моря свободно ото льда.

При средних условиях ледовитость составляет около 50 %, при этом парциальная площадь сплоченных льдов составляет 40 %, а разреженные и редкие льды занимают 10 % акватории. Половина площади моря свободна ото льдов.

При экстремально тяжелых условиях ледовитость составляет около 90 %, парциальная площадь сплоченных льдов почти 75 %, парциальная площадь разреженных и редких льдов около 15 %. Примерно 15 % площади моря свободно ото льдов.

В зависимости от типа ледовых условий в весенний период граница сплоченных льдов может занимать либо крайне южное положение, практически примыкая к кромке припая, либо, при тяжелом типе, может располагаться к западу от п-ова Канин Нос. Какого-либо устойчивого постоянного положения скопления сплоченных льдов на акватории юго-восточной части Баренцева моря не наблюдается.

Активное образование торосов на дрейфующих льдах обычно начинается в декабре-январе, при достижении льдами толщины 0.3-0.5 м. В среднем в ледяном покрове Печорского района преобладает торосистость 2-3 балла.

Вся акватория юго-восточной части Баренцева моря очищается ото льдов при экстремально легких условиях в конце мая, при средних условиях в первой декаде июля, а при экстремально тяжелых условиях в первой декаде августа.

Ледовые условия юго-восточной части Баренцева моря характеризуются большой межгодовой изменчивостью. В годы с легкими ледовыми условиями позднее ледообразование и небольшая интенсивность нарастания льда приводят к тому, что даже в период максимального развития ледяного покрова на трассах плавания будут наблюдаться только молодые и однолетние тонкие льды (до 70 см). В годы со сложными ледовыми условиями ледообразования начинается рано и проходит интенсивно. При максимальном развитии на пути плавания будут находиться однолетние льды толщиной до 120 см и более.

На Рисунке 6.6 показана ледовая обстановка в июле после мягкой, умеренной и суровой зимы.

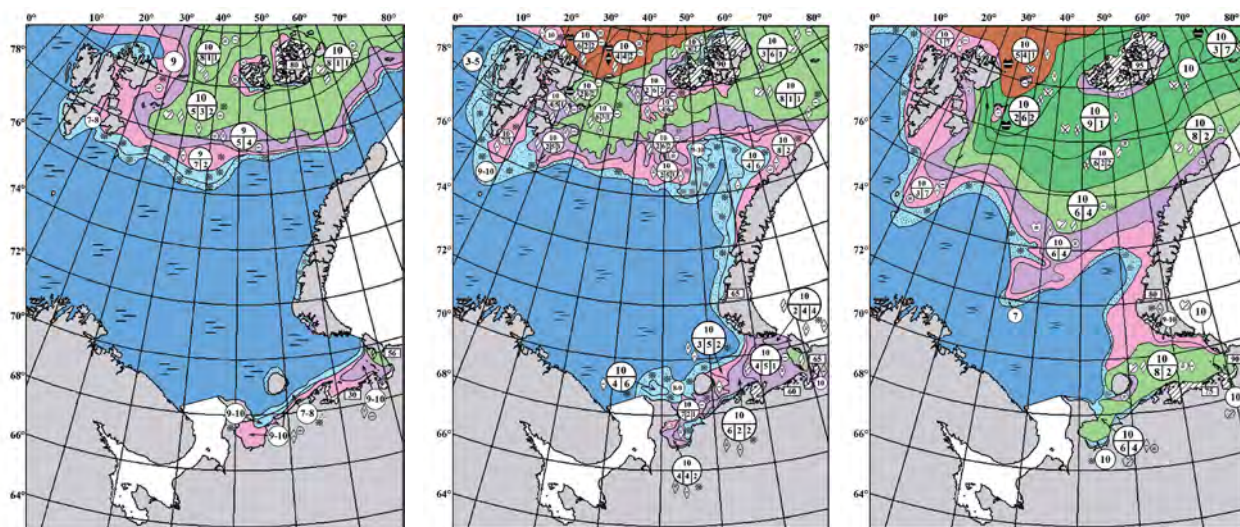


Рисунок 6.11 Ледовая обстановка в Баренцевом море в мягкую (а), умеренную (б) и суровую (в) зимы в январе

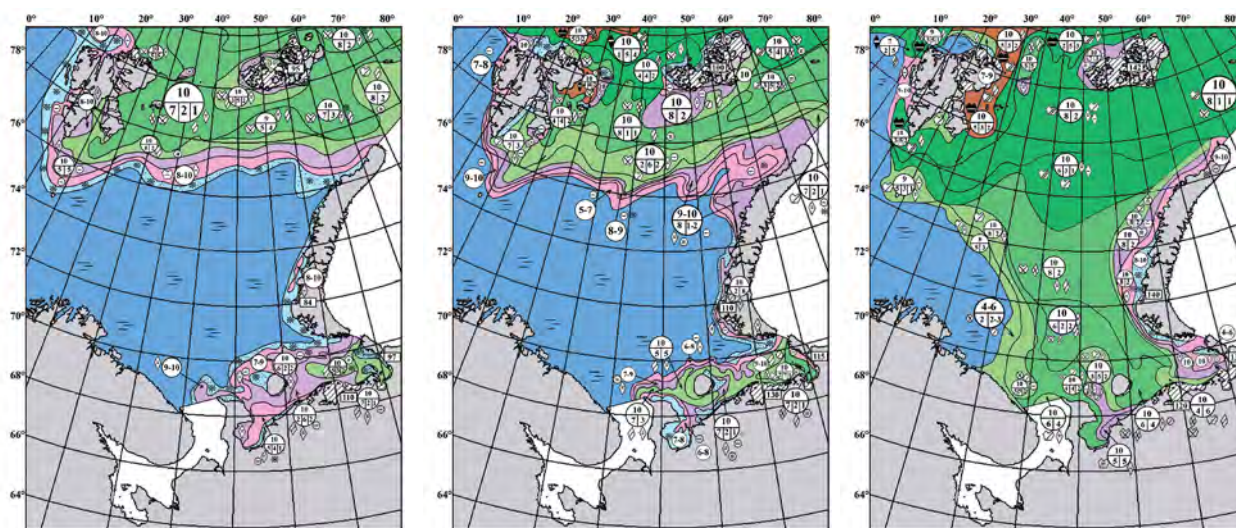


Рисунок 6.12 Ледовая обстановка в Баренцевом море после мягкой (а), умеренной (б) и суровой (в) зимы в апреле

Характеристика	Изображение	Примечание
Чистая вода		Льда нет
Прибой		Непокрытый морской лёд, прилегающий к берегу.
Толщина прибайкового льда		Толщина льда в см.
Грешина		Значок показывает не конкретную грешину, а лишь присутствие грешин в данном районе.
Торосистость льда		0 – ровный лёд; 1 – редкие торосы на ровном льду; 2 – ровный, частично торосистый лёд; 3 – лёд средней торосистости; 4 – сильно торосистый лёд; 5 – лёд, сплошь покрытый торосами.
Стамуха		Торосистое, связанное на мелководье образование.
Общая сцепленность дрейфующего льда		Отношение площади льдин в зоне к общей площади этой зоны, выраженное в десятых долях (баллах).
Возрастной состав льдов		10 – общая сцепленность; 6 – количество белого старого льда; 4 – количество белого молодого льда.
Большие ледяные поля		Горизонтальные размеры 0,5–2,0 км.
Характеристика	Изображение	Примечание
Символы ледяных полей		Горизонтальные размеры 100–500 м.
Крупноблочный лёд		Горизонтальные размеры 20–100 м.
<b>Возрастные характеристики льда</b>		
Начальные виды льда		Ледяное сало, айс, снегура, шуга, редкий лёд.
Нелесоные льды		Толщина льда менее 10 см.
Средней лёд		Толщина льда 10–15 см.
Средне-белый лёд		Толщина льда 15–30 см.
Белый однородный (белый) лёд		Толщина льда 30–70 см.
Оползательный лёд средней толщины		Толщина льда 70–120 см.
Толстый однородный лёд		Толщина льда > 120 см.
Оползательный однородный лёд		Лёд, который не растает за лето и находится в новом цикле замерзания до 31 декабря.
Двулетний лёд		Лёд, который не растает за лето и находится в новом цикле замерзания с 1 января.
<b>Характеристики сцепленности льда</b>		
Связанный и очень сцепленный лёд		Связанный лёд – 10 баллов, очень сцепленный лёд – 9–10 баллов.
Средоточный лёд		Лёд сцепленностью 7–8 баллов.
Разрыхленный лёд		Лёд сцепленностью 4–6 баллов.
Редкий лёд		Лёд сцепленностью 1–3 балла.

Рисунок 6.13. Условные обозначения, соответствующие [Номенклатура морских льдов, 1974]

### 6.4.1.1. Номенклатура морских льдов

Морской ледяной покров является открытой физической системой. Внешние воздействия со стороны ветра и течений, а также наклон уровня моря вызывают перемещение льда, разломы ледяных полей и торошение. Интенсивность этих процессов зависит от широты места, глубины моря и конфигурации берегов, системы течений в данном районе и режима ветров. Поэтому разработка динамики ледяного покрова должна в первую очередь основываться на фактических данных о морских льдах для различных географических условий [Тимохов, Хейсин, 1987]. Существенно также иметь детализированные сведения о строении ледяного покрова, специфические для конкретных водоемов.

Термины, характеризующие плавающий лёд и связанные с ним явления, используются давно. Некоторые из них (несяк, стамуха, ледяное небо и др.), возникшие еще во времена поморов, сохранились и сейчас. Новые понятия и термины были введены с внедрением в практику новых видов и методов наблюдений (наблюдения с самолета, с ИСЗ), развитием надводного и подводного ледового плавания и пр. В 1970 г. Всемирной метеорологической организацией была создана новая «Номенклатура ВМО по морскому льду (1968 г.)»,

подготовленная Рабочей группой по морским льдам на основе предложений, выработанных Советским Союзом. С учетом номенклатуры ВМО в 1974 г. было издано пособие «Номенклатура морских льдов. Условные обозначения для ледовых карт» [Номенклатура морских льдов, 1974], а также «Атлас ледовых образований» [Бушуев, 1974].

Для каждого термина в «Номенклатуре» дано определение. Приведем определения тех терминов, которые окажутся полезными при рассмотрении динамики ледяного покрова.

*Морской лёд*: любая форма льда, встречающаяся в море и образовавшаяся в результате замерзания морской воды.

*Возрастной состав льдов*: относительное количество льдов каждого возраста в десятых долях общей площади зоны. Сумма этих характеристик должна равняться общей сплоченности плавучих льдов в этой зоне.

*Ледовитость*: выраженное в процентах отношение площади, занятой льдом любой сплоченности, к общей площади моря или какого-либо большого географического района; этот район может быть глобальным, включающим площадь морей целого полушария, или ограниченным какой-либо частью океана или моря, например Баренцево море или Баффинов залив.

*Сплоченность*: отношение площади льдин в зоне, где они распределены сравнительно равномерно, к общей площади этой зоны, выраженное в десятых долях (баллах).

*Раздробленность*: степень разлома ледяного покрова. Определяется по среднему расстоянию между трещинами и каналами или по относительному количеству полей в зоне. При инструментальных наблюдениях определяется относительное количество всех форм плавучего льда.

*Сжатие льда*: дальнейшая стадия уплотнения льда после достижения им сплоченности 9—10 баллов. При сжатии льда обычно происходит его наслоение или торошение.

*Дрейф льда*: поступательное перемещение льдин в результате воздействия ветра и течения.

*Дрейфораздел*: граница между массивами или зонами льда, дрейфующими в разных направлениях или с разной скоростью. Признаками дрейфораздела являются повышенная раздробленность ледяного покрова, полосы тертого льда, пояса торошения, каналы и зоны разрежения. На дрейфоразделе часто наблюдается вращение льдин.

*Торошение*: образование торосов в результате сжатия морских льдов.

*Разводье*: любой разлом или разрыв очень сплоченного, сплошного, смерзшегося сплошного льда, припая или отдельной льдины в результате подвижек и процессов деформации. Разводья могут быть заполнены ледяной кашей, покрыты ниласом или молодым льдом. Протяженность их колеблется от метров до нескольких километров.

*Канал*: любой разлом или проход через морской лед для надводных кораблей.

*Трещина*: любой разрыв льда, который не разошелся.

*Полынья*: устойчивое пространство чистой воды среди неподвижных льдов или на их границе.

Оценка характеристик ледяного покрова производится в баллах как при визуальных, так и при инструментальных наблюдениях. Некоторые характеристики (сплоченность, возрастной состав льдов, наслоенность) выражаются в десятых долях от площади льда, на которой

производится оценки. Ряд характеристик (густота айсбергов, торосистость, загрязненность) оценивается количественно (в баллах); другие же (сжатость, разрушенность, заснеженность, всхолмленность) оцениваются качественно по прямым или косвенным признакам.

Ледообразование на акватории моря начинается обычно в сентябре, но сроки появления льда и образования сплошного ледяного покрова из года в год сильно колеблются. Устойчивый припай ежегодно устанавливается в бухтах на Новой Земле, у побережья о-вов Белый, Виктория, Колгуев, а также в некоторых заливах южного побережья (Печорская губа, Хайпудырская губа и др.). Вдоль открытого побережья Новой Земли и материка от пролива Югорский Шар до м. Канин Нос ширина припая обычно не превышает нескольких сотен метров (в редких случаях - километров), при этом он подвергается частым взломам.

#### **6.4.2. Метеорологические условия**

Для оценки статистических характеристик метеорологических параметров, скорости ветра и высоты ветровых волн, использовались несколько источников исходных данных.

Основной источник сведений о скорости ветра – данные реанализа метеорологических полей CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) за 31-летний период с 1.01.1979 по 31.12.2009. Система CFSR описана в статье [Saha et al., 2010]. Реанализ CFSR представляет собой третью версию реанализов NCEP (Национальных центров прогнозирования состояния окружающей среды, США), в которой устранены имевшие место в прежних версиях ошибки, повышено пространственное и временное разрешение, расширен список усваиваемых данных, усовершенствована процедура анализа, реализован совместный анализ метеорологических и океанографических данных. В число усваиваемых данных включены, в частности, данные спутниковых скаттерометров ERS-1/AMI, ERS-2/AMI, QuikSCAT и WindSat, что существенно повышает качество анализа используемых данных о скорости приводного ветра.

Преимуществом этих данных является регулярное покрытие по пространству и времени. Самая высокая среди реанализов временная (ежечасная) дискретность предоставляет возможность детального прослеживания развития штормовых эпизодов и обеспечивает высокую точность расчета параметров ветрового волнения. Охватываемый этим источником данных 30-летний временной интервал позволяет прослеживать межгодовую/междесятилетнюю изменчивость ветровых условий. Эти данные могут также использоваться для оперативного метеорологического обеспечения морских операций, так как система поддерживает пополнение данных вплоть до сегодняшних дней с небольшой задержкой по времени.

Из всего многообразия данных реанализа выбирались данные по скорости ветра на стандартной высоте 10 м. Пространственное разрешение данных в районе терминала Варандей ~12 км × 34 км. Дискретность по времени 1 час.

Из набора данных CFSR извлекалась также информация о распределении морского ледового покрова. Такая информация требуется для проведения расчетов ветрового волнения, развитие которого на открытой воде существенно зависит от положения границы льдов.

Дополнительный источник сведений о скорости ветра – спутниковые данные, получаемые с помощью скаттерометра. Эти данные имелись за период 09.07.1987–31.12.2011. Их дискретность по времени 6 часов.

Спутниковые измерения не имеют регулярного покрытия в пространстве и по времени (см. пример глобальной карты покрытия Рисунок 10.4). Но, в отличие от реанализов, они представляют собой непосредственные измерения с гораздо меньшим, чем в реанализах,

влиянием интерполяционных процедур, которые могут приводить к занижению анализируемых значений. Эти данные использовались для оценки репрезентативности данных CFSR и определения необходимости введения поправочных коэффициентов при последующем использовании этих данных для подсчета статистик ветра и расчета ветровых волн.

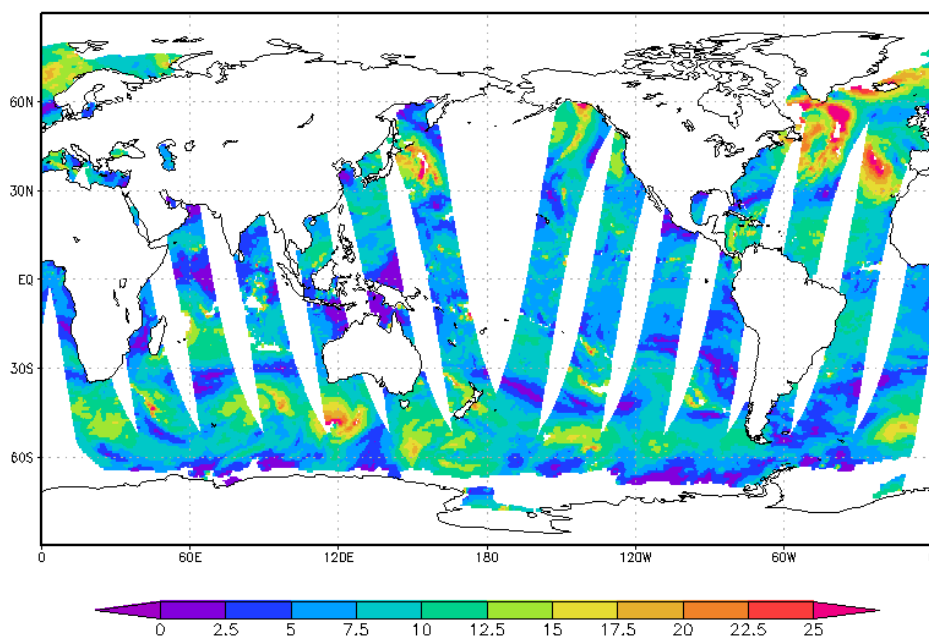


Рисунок 6.14. Скорость ветра (м/с) 28 декабря 1989 г. по данным спутникового скаттерометра.

Данные о высоте ветровых волн получены путем расчетов по спектральной модели WaveWatch III version 3.14 [Tolman, 2009]. Входной информацией для модели служили указанные выше данные CFSR о скорости ветра.

Результаты верификации технологии прогнозирования ветровых волн в Гидрометцентре России на основе указанной модели, свидетельствующие о хорошей точности расчетов по модели WaveWatch III v 3.14 в созданной в Гидрометцентре России конфигурации, представлены в публикациях [Strukov et al., 2012; Струков и др., 2013; Зеленко и др., 2014].

Расчеты характеристик ветровых волн для юго-восточной части акватории Баренцева моря проведены по фактическому ветру CFSR на сетке с горизонтальным разрешением около 10 км ( $0,25^\circ$  по долготе,  $0,1^\circ$  по широте) (Рисунок 10.5) и с ежечасным выводом результатов. Крестики – узлы сетки, черный квадратик – положение платформы Приразломная, черные треугольники с номерами 1, 2, 3 (район терминала Варандей), 4 – положение узлов, для которых выводились функции распределения.

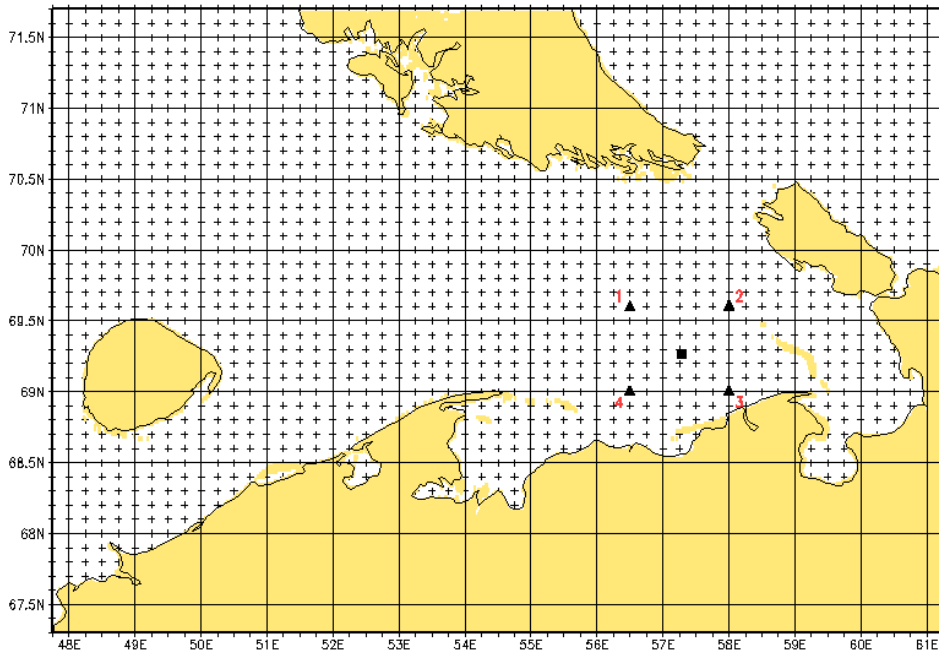


Рисунок 6.15. Сеточная область расчета ветровых волн в Баренцевом море.

Для прослеживания динамики многолетней изменчивости все статистики, включая интегральные функции распределения, а также повторяемости различных значений и разных направлений вектора скорости ветра (градуированные розы ветров) и высоты ветровых волн, подсчитаны для трех десятилетних периодов: 1980–1989 гг., 1990–1999 гг. и 2000–2009 гг.

Вместо интегральной функции распределения, определяемой в математической статистике для случайной величины  $X$  как  $F(x) = P(X < x)$ , в дальнейшем мы будем рассматривать дополнение к функции распределения  $F'(x) = 1 - F(x) = P(x \leq X)$ , представляющее собой вероятность превышения величиной  $X$  заданного значения  $x$ . Для кратности  $F'(x)$  будем называть функцией распределения и выражать ее значения в процентах.

Вероятности превышения скорости ветра по акватории Баренцева моря, прилегающей к местоположению платформы Приразломная ( $\lambda=47,8124^\circ-62,1874^\circ$  в.д.;  $\varphi=67,285^\circ-71,656^\circ$  с.ш.), построены для пороговых значений скорости ( $x=U$ ,  $U$  – скорость ветра) 7,5 м/с, 10 м/с, 12,5 м/с, 15 м/с и для трех сезонных периодов: май–август, сентябрь - декабрь и весь год (январь - декабрь). Пример географических распределений таких вероятностей для порогового значения 10 м/с за вторую половину безледного периода (сентябрь - декабрь) показан на Рисунке 10.6.

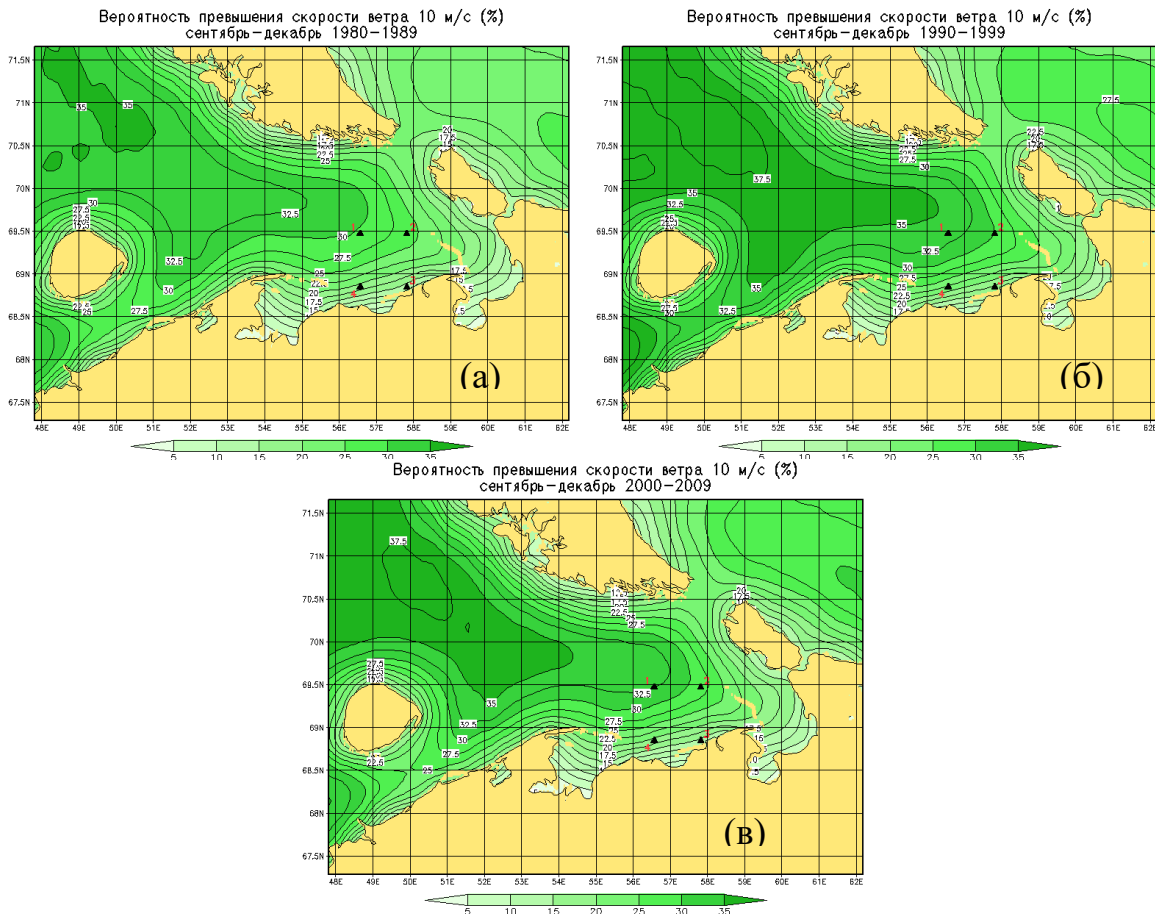
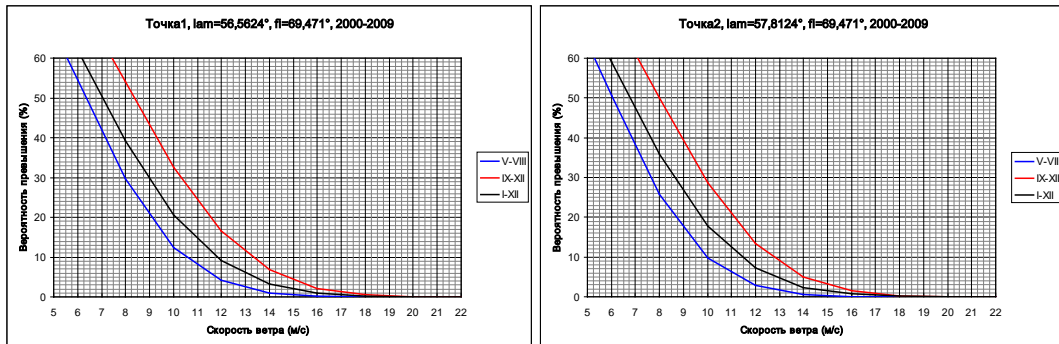


Рисунок 6.16. Вероятности превышения скорости ветра 10 м/с (%) во вторую половину безледного периода (сентябрь–декабрь) для трех десятилетий: (а) 1980–1989 гг., (б) 1990–1999 гг., (в) 2000–2009 гг.

Для четырех точек, показанных на Рисунке 10.6 черными треугольниками, построены функции распределения превышений с дискретностью пороговых значений 2 м/с. Примеры таких распределений для периода 2000–2009 гг. показаны на Рисунке 10.7, а на Рисунке 10.8 в одной из таких точек для трех десятилетий. Координаты точек указаны в заголовках каждой из четырех панелей.



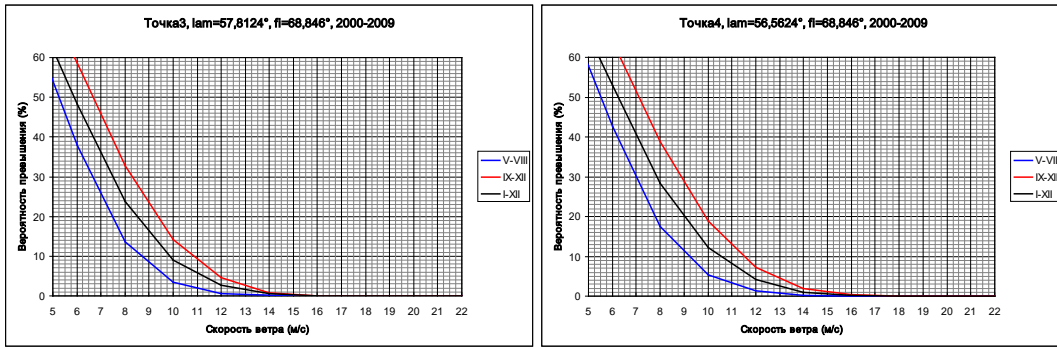


Рисунок 6.17. Функции распределения скорости ветра в четырех точках в окрестности платформы Приразломная в 2000–2009 гг. для трех сезонных периодов: май–август (V–VIII, синие линии), сентябрь–декабрь (IX–XII, красные линии) и весь год (I–XII, черные линии).

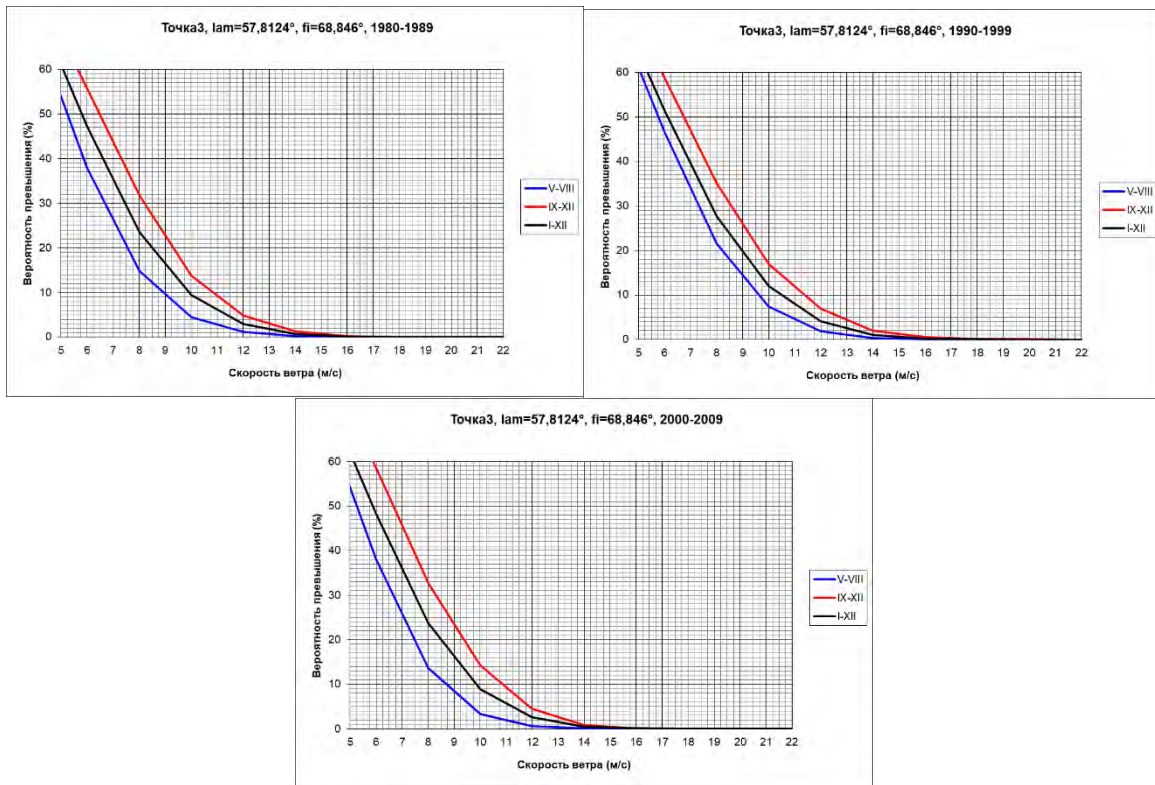


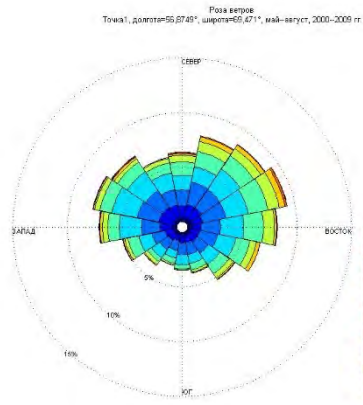
Рисунок 6.18. Функции распределения скорости ветра в точке 3 у терминала Варандей в 1980–1989, 1990–1999 и 2000–2009 гг. для трех сезонных периодов: май–август (V–VIII, синие линии), сентябрь–декабрь (IX–XII, красные линии) и весь год (I–XII, черные линии).

### 6.4.3. Розы ветров

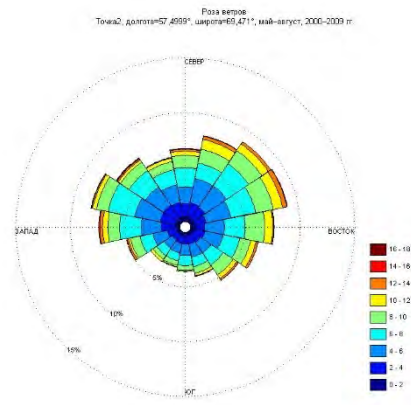
Розы ветров, как и прочие статистики, построены для трех хронологических (1980–1989, 1990–1999, 2000–2009) и трех сезонных периодов (май–август, сентябрь–декабрь и весь год (январь–декабрь)). Все построения выполнены для четырех точек (треугольные значки на Рисунке 10.5)

Примеры показаны на Рисунке 10.9. Координаты точек указаны в заголовках каждой из четырех панелей.

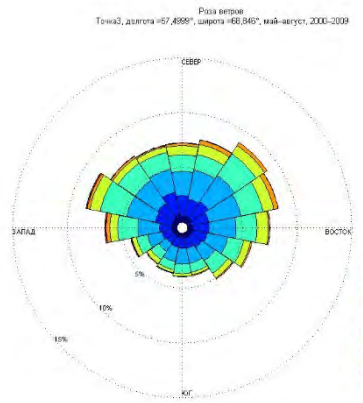




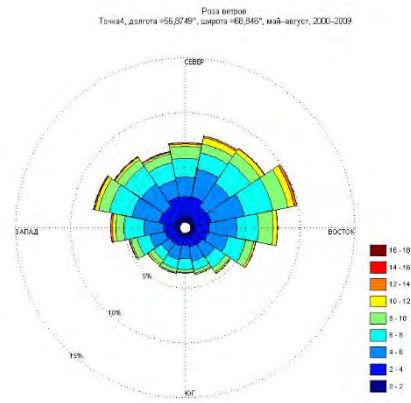
точка 1



точка 2

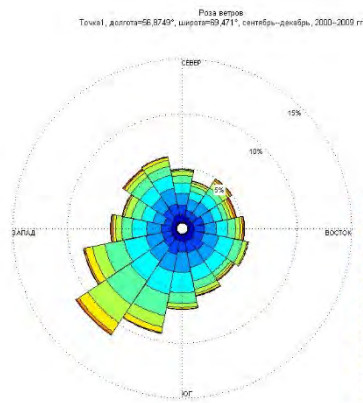


точка 3

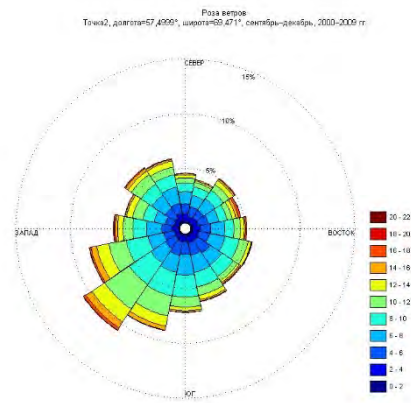


точка 4

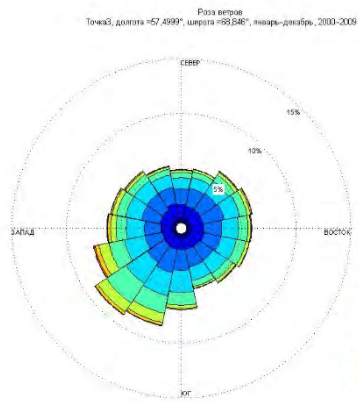
Рисунок 6.19. Розы ветров для первой половины безледного периода (май – август) за 1999–2009 гг. в четырех точках



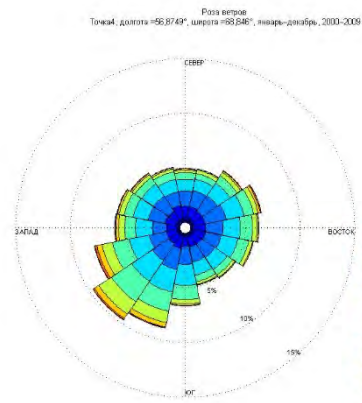
точка 1



точка 2

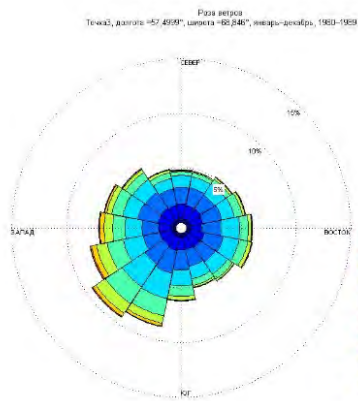


точка 3

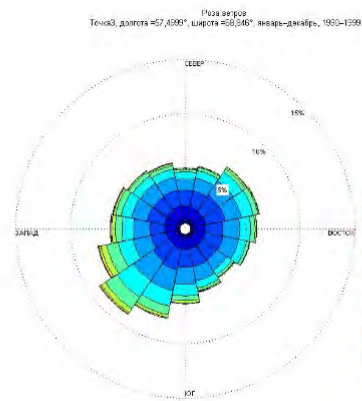


точка 4

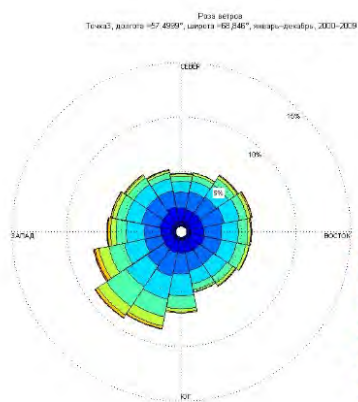
Рисунок 6.20. Розы ветров для второй половины безледного периода (сентябрь-декабрь) за 1999–2009 гг. в четырех точках



1980-1989



1990-1999



2000-2009

Рисунок 2.24. Сопоставление среднегодовых роз ветров в расчетной точке 3

Визуальное и расчетное сопоставление роз ветров показывает, что за наблюдаемый период 30 лет не отмечаются значимые тенденции в изменении циркуляции ветра, анализируемый ряд наблюдений имеет однородный характер.

#### 6.4.4. Статистика высот ветровых волн

Развитие волн существенно зависит от состояния ледового покрова, полностью подавляющего волны при сплошном покрытии.

Вероятности превышения высот ветровых волн, рассчитанных указанным выше способом, построены для пороговых значений высот 1,5 м, 2 м, 2,5 м, 3 м, 4 м и 5 м для таких же, как и для ветра, хронологических периодов (1980–1989, 1990–1999, 2000–2009 гг.) и сезонов: май–август, сентябрь–декабрь и весь год (январь–декабрь).

Пример географических распределений таких вероятностей для порогового значения 3 м за вторую половину безледного периода (сентябрь - декабрь) показан на Рисунке 10.11.

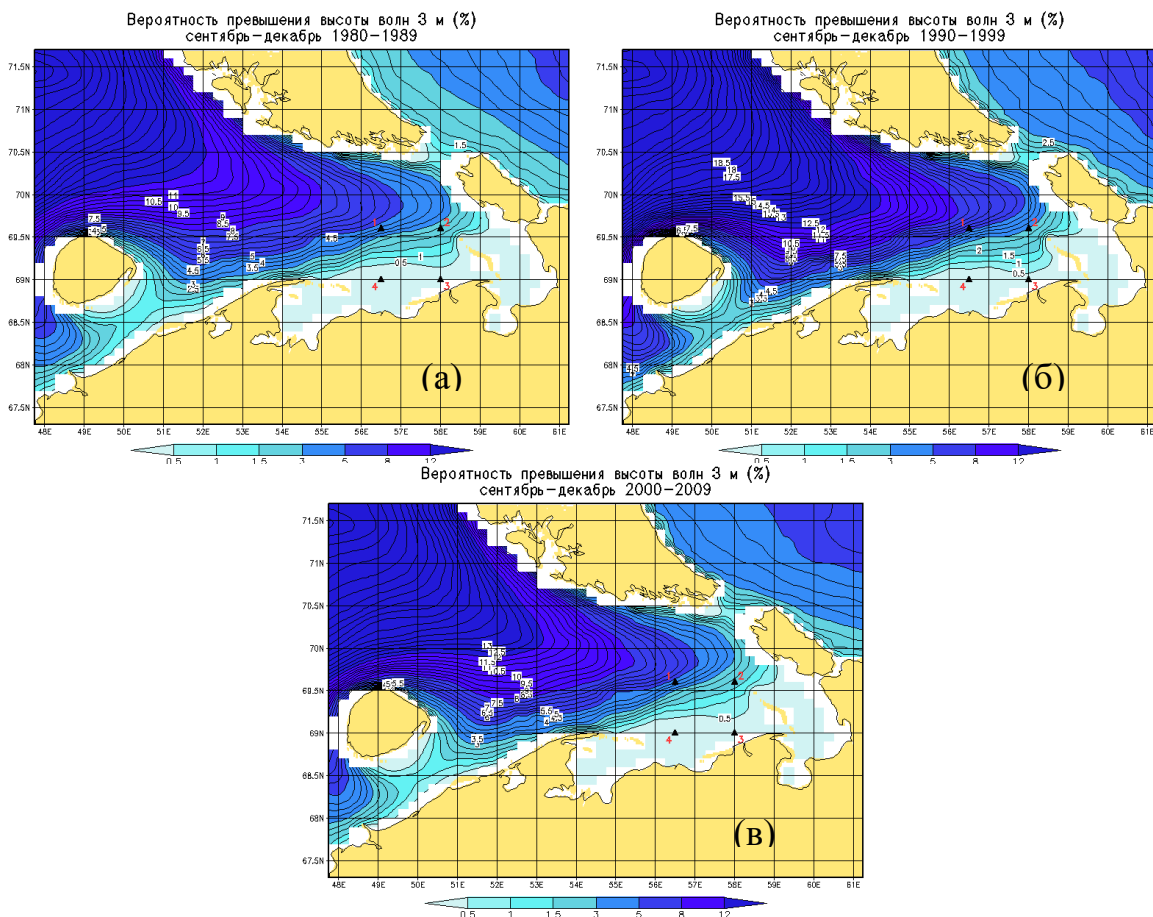


Рисунок 6.21. Вероятности превышения высот волн 3 м (%) во вторую половину безледного периода (сентябрь–декабрь) для трех десятилетий: (а) 1980–1989 гг., (б) 1990–1999 гг., (в) 2000–2009 гг.

Как и для ветра, на рассматриваемом 30-летнем интервале времени значимых изменений статистических характеристик высот волн не прослеживается, что и следовало ожидать, так как определяющим факторов генерации и развития волнения являются ветровые условия.

Статистические распределения с большей детализацией (с дискретностью по высотам 0,5 м) построены для четырех точек около Приразломной, обозначенных на Рисунке 10.5 оцифрованными треугольными значками. Примеры таких распределений показаны на Рисунке 10.12. Координаты точек указаны в заголовках каждой из четырех панелей.

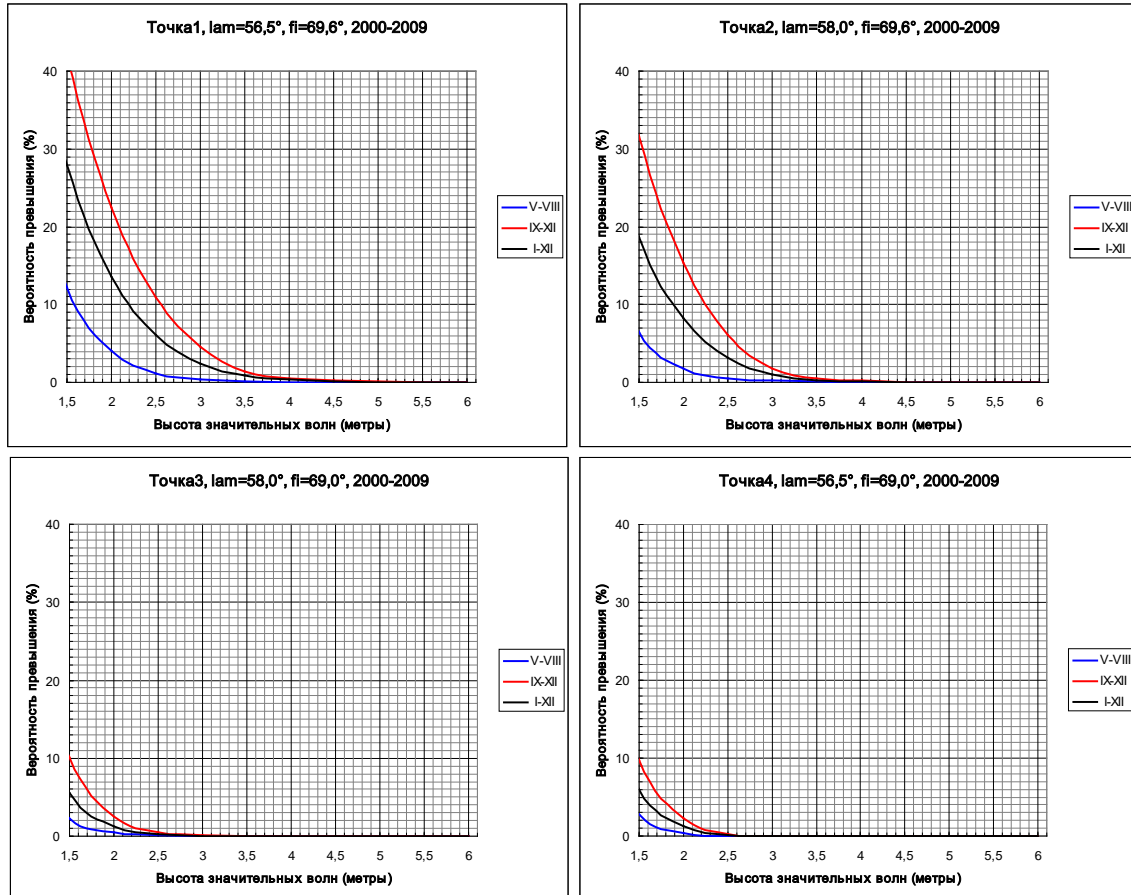


Рисунок 6.22. Функции распределения высот волн в четырех точках в окрестности платформы Приразломная в 2000–2009 гг. для трех сезонных периодов: май–август (V–VIII, синие линии), сентябрь–декабрь (IX–XII, красные линии) и весь год (I–XII, черные линии).

Как видно из Рисунков 10.11 и 10.12, географическая изменчивость характеристик ветровых волн в пределах сравнительно небольшой по протяженности области с характерным размером 60 км (окаймляемой треугольными значками на Рисунке 10.5) существенно выше, чем аналогичная изменчивость ветровых условий. Это, очевидно, обусловлено сильной зависимостью условий развития волнения от батиметрии и удаленности от суши, а также от кромки льда.

## 6.4.5. Термохалинные характеристики Печорского моря

### 6.4.5.1. Температура воды

По данным <http://esimo.oceanography.ru> в поверхностном слое воды Баренцева моря максимальная температура наблюдается в юго-западной части моря (9°C в июне -сентябре), минимальная (0°C) - у кромки льда. С июля по октябрь область максимальных температур

распространяется также и на юго-восточную часть моря, положение изотерм становится близким к широтному (см. Рисунки 10.13 (а, б)).

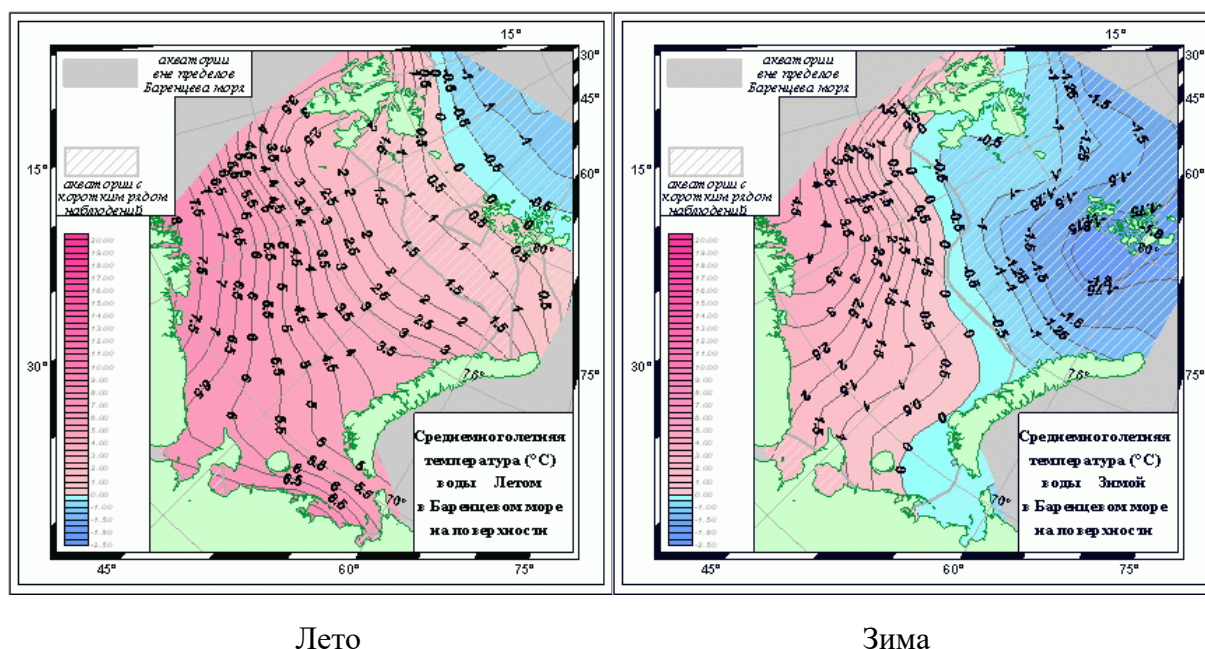


Рисунок 6.23 Среднегодовое распределение температуры воды в Баренцевом море

Сезонное изменение температуры воды повсеместно невелико, на юго-западе и в северной части моря оно не превышает 5-6°C и только на юго-востоке достигает 10°C. В районах, где возможно появление льда, абсолютный минимум ограничен температурой замерзания, равной -1.8°C. Летние максимальные температуры в поверхностном слое достигают в северо-западной части моря 4-7°C, на юго-востоке 15°C в открытой части моря и 20-23°C в Печорской губе. С глубиной колебания температуры воды уменьшаются.

В юго-восточной части моря изменения температуры с глубиной имеют ярко выраженный сезонный ход. Зимой температура всей толщи воды отрицательна. Весной верхний 10 - 12-метровый слой охватывается прогревом, ниже его температура резко понижается ко дну. Летом прогревание поверхностного слоя достигает наибольших величин, поэтому понижение температуры между горизонтами 10 и 25 м происходит резким скачком. Осенью охлаждение выравнивает температуру по всему слою, которая к зиме становится почти однородной по вертикали.

Температура воды принадлежит к числу важнейших элементов гидрологического режима любого морского бассейна. Термический режим Печорского моря складывается под влиянием радиационных и адвективных факторов. Закономерные изменения радиационного баланса в годовом ходе, а также стабильные (при многолетнем осреднении) условия водообмена обуславливают устойчивость климатических характеристик температуры воды. Наряду с этим, температуре воды свойственна значительная временная изменчивость, обусловленная нестационарностью течений и ледовых условий.

Вертикальные профили средней месячной температуры воды по данным (Гидрометеорология..., 1990) представлены на рисунке 10.14.

Среднемесячные температуры воды поверхностного слоя в ледовый период (с декабря по май) находятся вблизи температуры замерзания морской воды при данной солености (минус 1.7°C). В течение лета температура быстро растет, достигая уже в июне 3.5-5°C

(Гидрометеорологические условия..., 1984), к августу – максимума в 8–9°C (Отчет, 2000). В течение осени температура воды опускается, причем характерно замедленное падение температуры осенью по сравнению с весенним ростом. Более мелководная южная часть лицензионного участка прогревается быстрее, чем более глубоководная северная, здесь уже в июле температуры достигают 11°C (Гидрометеорологические условия..., 1984). Однако уже в августе начинается остывание.

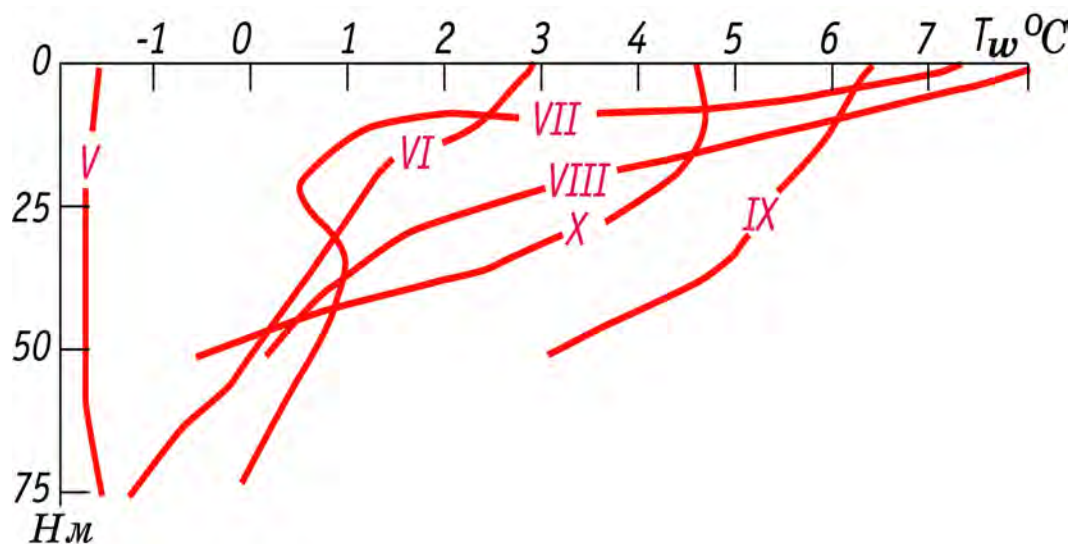


Рисунок 6.24 – Вертикальные профили средней месячной температуры воды в Печорском море (по: Гидрометеорология..., 1990)

Распределение температуры по вертикали отражает такие процессы, как формирование сезонного термоклина и конвективное перемешивание. В ледовый период (декабрь – май) температура по всему вертикальному профилю равна поверхностной и близка к температуре замерзания воды при данной солености. В начале июня начинается интенсивный летний прогрев, охватывающий верхний квазиоднородный слой мощностью, как правило, около 10 м или немного меньше, температуры в котором соответствуют температурам поверхностного слоя. Глубже формируется сезонный термоклин, уже в июле охватывающий всю толщу воды. Таким образом, в летний период этому району свойственна сильно выраженная термическая стратификация, усиленная поступлением большого объема речных вод. Максимальный температурный градиент наблюдается в верхней части термоклина (горизонт 10–25 м), глубже градиент уменьшается. Максимальная вертикальная стратификация водной массы достигается в августе, когда вертикальный градиент в слое 10–25 м может превышать 0,4°C/м (Гидрометеорология..., 1990). С начала сентября термоклин начинает быстро разрушаться, так как поверхностный слой теряет тепло, отдавая его одновременно и в атмосферу, и в нижележащие слои. В то же время термоклин продолжает прогреваться, и годовой максимум температуры в нем наблюдается именно в этом месяце, составляя на глубине 25 м около 4°C. Таким образом, для гидрологического режима Печорского моря характерно запаздывание годового максимума температуры воды по мере увеличения глубины. В итоге к середине сентября на южной границе участка и к середине ноября на северной в результате интенсивного выхолаживания поверхностного слоя термоклин полностью исчезает, температура воды по всей вертикали выравнивается, после чего продолжает падать до температуры замерзания (Гидрометеорология..., 1990, Изменчивость природных ..., 2004).

Среднегодовая температура воды поверхностного слоя в верхнем квазиоднородном слое составляет 1,6–2,0°C. С глубиной она убывает, и глубже 30 м становится отрицательной.

Пределы изменчивости температуры воды в ледовый период не превышают 0.1–0.2°C, находясь все время около точки замерзания. Максимальная изменчивость температуры воды наблюдается в августе в поверхностном слое, где она превышает 21°C.

Представление о годовом ходе и экстремальных характеристиках температуры воды на мелководье у о. Песяков можно получить по данным наблюдений на расположенной поблизости ГМС Варандей за 1972–2012 гг., представленным в Таблице 10.3. Для мелководий вдоль Западных Гуляевских Кошек репрезентативными являются данные наблюдений на ГМС Ходовариха, представленные в таблице 10.4, в которой приводится среднемесячная многолетняя температура воды по наблюдениям с 1975 по 2012 гг. Абсолютный максимум температуры воды, наблюдавшийся на этой ГМС 11 июля 1990 г., составляет 19.1°C, абсолютный минимум – минус 1.9°C.

Таблица 6.3 – Характеристики температуры воды на ГМС Варандей за 1972–2012 гг., °C

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Минимум	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.0	-0.6	0.2	-0.6	-1.9	-2.1	-2.2	-2.2
Среднее	-1.8	-1.9	-1.9	-1.8	-1.4	1.7	8.9	9.0	5.5	0.6	-1.6	-1.8	1.1
Максимум	-1.4	-1.5	-1.4	1.0	8.5	20.0	23.9	20.5	12.9	7.6	0.9	-1.1	23.9

Таблица 6.4 – Среднемесячная многолетняя температура воды на ГМС Ходовариха по данным наблюдений за 1975–2012 гг., °C

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Среднее	-1.8	-1.8	-1.8	-1.8	-1.2	2.1	7.1	8.3	6.2	2.2	-1.0	-1.8	1.2

Средняя годовая температура поверхностного слоя воды на ГМС Варандей и Ходовариха составляет 1.1–1.2°C. При этом около 210 дней в году поверхностный слой воды имеет отрицательную температуру.

По результатам спектрального анализа достоверно выделяются колебания температур воды с полусуточным периодом, имеющие приливное происхождение, обуславливающие большую часть изменчивости температуры воды в термоклине. В слое термоклина характерные значения изменений температуры воды в летние месяцы, обусловленные приливами, составляют 1.0–1.5 °C. В квазиоднородном слое они имеют меньшую амплитуду, чем в термоклине: 0.2–0.5 °C (Изменчивость природных ..., 2004) и затушеваны более заметными синоптическими колебаниями с периодом более суток (Гидрометеорология..., 1990). Колебания температур воды в верхнем квазиоднородном слое и в слое термоклина практически не связаны между собой. В то же время зимой, в состоянии гомотермии, изменения температуры на всех горизонтах тесно связаны между собой (Гидрометеорология..., 1990).

#### 6.4.5.2. Соленость воды

Соленость любого морского бассейна определяется интенсивностью его водообмена с Мировым Океаном, осадками, речным стоком, испарением, а также процессами образования и таяния льда. Для Печорского моря ведущим является первый из этих факторов.

Временная изменчивость солености относительно невелика, методика измерений обеспечивает высокую точность полученных данных, поэтому достоверные сведения о режиме солености можно получить и по небольшому числу наблюдений. Однако если температурный режим на протяжении ледового периода практически однороден, и выводы о нем можно сделать даже по единичным измерениям, то режим солености при наличии льда, наоборот,

усложняется, и для его уточнения в будущем необходимо будет провести дополнительные исследования.

Вертикальные профили средней месячной солености воды по данным [Гидрометеорология..., 1990] представлены на Рисунке 6.25.

В целом соленость воды в Печорском море имеет несколько более низкие значения, чем в открытых частях Баренцева моря, прежде всего, за счет распреснения водами р. Печора и во вторую очередь – за счет поступления распресненных вод Карского и Белого морей. Годовой ход выражен очень хорошо. Максимум солености наблюдается в мае и составляет около 34.0 ‰ на поверхности и около 34.2 ‰ глубже 30 м [Гидрометеорология..., 1990]. С начала июня начинается быстрое распреснение вод, связанное прежде всего с прохождением волны половодья на р. Печора, и в меньшей степени – с таянием морского льда, и в июле наблюдается минимум солености, составляющий на южной границе участка, наиболее близкой к устью р. Печора, около 14 ‰, а на наиболее удаленной от него северной границе участка – около 28 ‰ (Гидрометеорологические условия..., 1984). Распреснение затрагивает почти исключительно верхний квазиоднородный слой мощностью около 10 м или немного меньше. Глубже наблюдается галоклин мощностью около 10 м, вертикальные градиенты солености в котором на южной границе участка превышают 1 ‰/м. Ниже галоклина расположен глубинный слой, сохраняющий характерные для ледового периода значения солености.

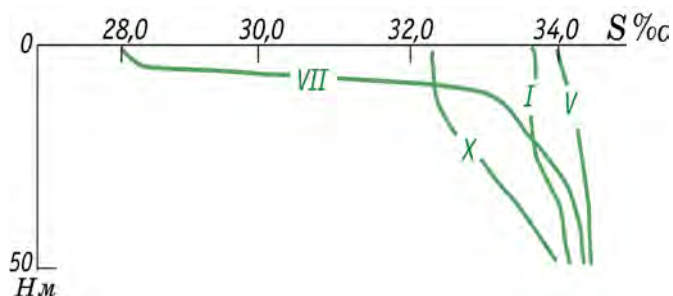


Рисунок 6.25 – Вертикальные профили средней месячной солености воды в Печорском море (по: Гидрометеорология..., 1990)

С начала августа, когда средний месячный речной сток уменьшается по сравнению с половодьем в 3–5 раз, соленость в верхнем квазиоднородном слое начинает возрастать, а галоклин – размываться. К октябрю соленость поверхностных вод возрастает до 24 ‰ на южной границе лицензионного участка и до 33 ‰ – на северной. Мощность галоклина увеличивается до 20 м, и в то же время вертикальные градиенты в нем уменьшаются до 0.05 ‰/м. Глубже 30 м лежит глубинный слой, в котором соленость несколько снижается по отношению к маю – июлю и составляет около 34.0 ‰ [Гидрометеорология..., 1990].

К середине ноября галоклин исчезает, и соленость становится практически однородной по вертикали: 33.5 ‰ на поверхности и 34.0 ‰ в глубинном слое. Далее до мая происходит медленное увеличение солености по всему вертикальному профилю за счет вымораживания солей из льда при сохранении небольшой (0.5–0.2 ‰) разницы между поверхностным и глубинным горизонтами [Гидрометеорология..., 1990].

#### 6.4.5.3. Плотность воды

Режимные характеристики плотности морской воды полностью определяются режимом температуры и солености, но, тем не менее, имеют большое самостоятельное значение. Изменения плотности по горизонтали обуславливают плотностную циркуляцию вод, от его



вертикального распределения зависят устойчивость водных масс и процесс конвективного перемешивания.

В связи с очень хорошо выраженным годовым ходом солености и относительно менее выраженным ходом температуры, определяющим фактором годового хода плотности является соленость, что характерно для всего Северного Ледовитого океана. В июне – июле верхний слой моря характеризуется очень сильной плотностной стратификацией: условная плотность в верхнем квазиоднородном слое менее 22, ниже пикноклина около 27 (рисунок 10.16), и соответственно очень высокой вертикальной устойчивостью водных масс, пикноклин практически совпадает с галоклином. С начала августа плотность верхнего квазиоднородного слоя начинает уменьшаться вместе с уменьшением солености, и к октябрю составляет 23–26 при сохранении ниже пикноклина плотности около 27 (Гидрометеорология..., 1990). К декабрю плотность выравнивается на этом значении по всей вертикали, что создает благоприятные условия для конвективного перемешивания по всей толще воды. Для Печорского моря характерен так называемый полярный тип конвективного перемешивания, при котором вертикальная циркуляция начинается еще до начала ледообразования в результате понижения температуры воды на поверхности и затем продолжается в течение всего ледового периода уже за счет осолонения вод при ледообразовании (Залогин, Макурова, 1975).

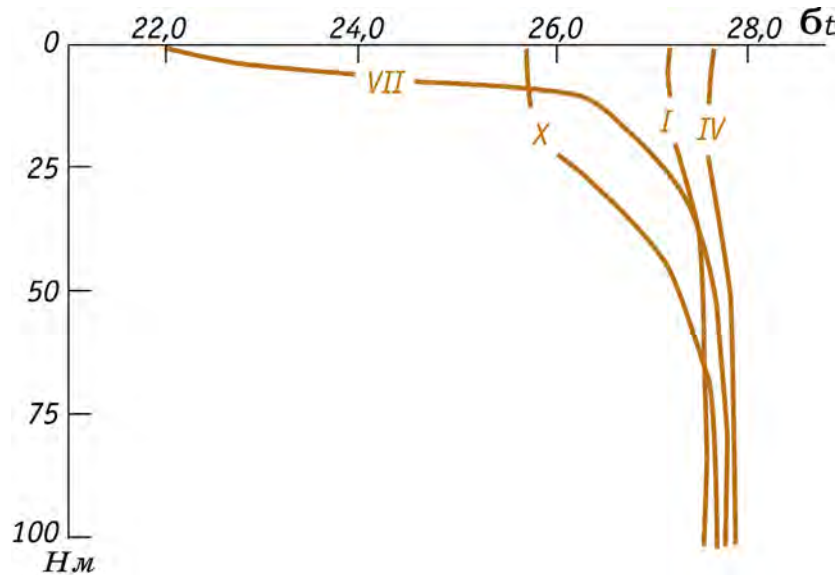


Рисунок 6.26 – Вертикальные профили средней месячной условной плотности воды в Печорском море (по: Гидрометеорология..., 1990)

Среднее квадратическое отклонение условной плотности составляет в поверхностном слое 0.3–0.4 зимой и до 4.0 летом, ниже пикноклина 0.1–0.2 зимой и 0.3–0.5 летом [Гидрометеорология..., 1990].

## 6.5. Тематический набор данных для моделирования

### 6.5.1. Общая схема моделирования гидрометеорологических условий

Вычислительный комплекс для расчета скорости ветра, скорости течений и характеристик морского льда включал в себя модели: атмосферной циркуляции (региональная негидростатическая модель атмосферы WRF ARW), морской циркуляции (модель INMOM, Institute of Numerical Mathematics Ocean Model).

Модель WRF ARW (Weather Research and Forecast Model Advanced Research WRF) [Skamarock, 2008] использовалась для расчета метеорологических характеристик. Модель WRF разработана организациями NCEP (National Centers for Environmental Prediction) и NCAR (National Center of Atmospheric Research) и является негидростатической моделью и принята во многих зарубежных и отечественных центрах для проведения ретроспективных расчетов с высоким пространственным разрешением, а также для прогноза региональной атмосферной циркуляции.

Модель INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [Дианский, 2013] использовалась для расчета скорости течений и сплоченности морского льда. Модель была создана в Институте Вычислительной Математики РАН (ИВМ РАН). Главная особенность INMOM, которая отличает ее от других известных и общепринятых моделей океана, таких как MOM [Pacanovsky et al., 2000], заключается в том, что при численной реализации в INMOM используется метод расщепления по физическим процессам и пространственным координатам [Marchuk et al., 2005]. Модель INMOM хорошо апробирована, глобальные версии данной модели используются в международных экспериментах CORE (Coordinated Ocean-ice Reference Experiments) и AOMIP (Arctic Ocean Model Intercomparison Project). Результаты верификации по данной модели показывают хорошее соответствие результатов расчетов с данными измерений.



Рисунок 6.27. Блок-схема ретроспективного воспроизведения гидрометеорологических полей

Качество расчета морской циркуляции определяется во многом качеством расчета атмосферного воздействия, получаемого с помощью модели WRF. Следует отметить, что эта модель, в силу своего высокого качества и удобства использования, принята во многих зарубежных и отечественных центрах для воспроизведения и прогноза региональной атмосферной циркуляции.

### 6.5.2. Адаптация модели атмосферной циркуляции WRF

Необходимые характеристики атмосферных приводных параметров рассчитаны с использованием модели WRF версии 3.6, разработанной организациями NCEP (National Center for Environmental Prediction) и NCAR (National Center of Atmospheric Research) США.

Расчетная область, используемая для расчета метеорологических характеристик над акваторией Баренцева и Карского морей по модели WRF, показана на рисунке 6.2. Используется пространственная сетка с шагом 25 км в равноугольной конической проекции Ламберта.

Для задания начальных и граничных условий модели WRF использован массив данных реанализа CFSR версии 1 [Saha *et al.*, 2010], публично предоставленный NCAR (National Center for Atmospheric Research)<sup>8</sup> с разрешением по пространству  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  и 6 часов по времени.

Данные о подстилающей поверхности взяты из предоставляемого NCAR архива MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)<sup>9</sup> с пространственным разрешением  $5' \times 5'$ .

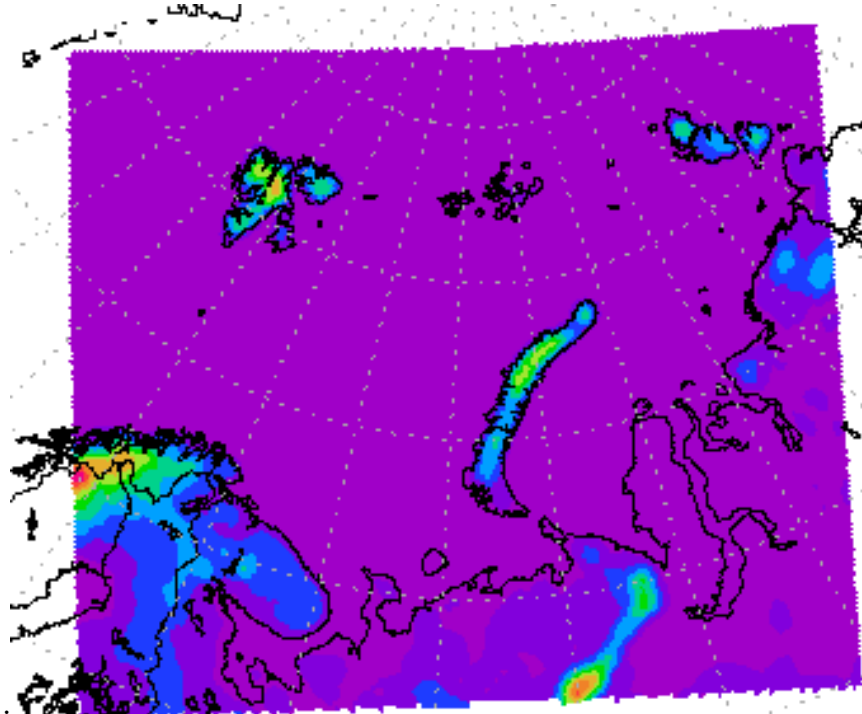


Рисунок 6.28. Расчетная область для модели WRF

Были выбраны следующие вычислительные параметры модели WRF:

- горизонтальное разрешение – 25 км;
- 27 вертикальных уровней, верхняя граница на уровне 50 гПа;
- интегрирование по времени уравнений атмосферной гидротермодинамики осуществляется методом Рунге-Кутты третьего порядка с шагом по времени 2.5 мин.

### 6.5.3. Адаптация модели морской циркуляции INMOM

Для решения задачи расчета течений и сплоченности ледового поля использовалась апробированная российская модель INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [Дианский *и др.*, 2013; Zalesny, 2010; Zalesny, 2012], разработанная в ИВМ РАН. Модель INMOM была адаптирована к условиям акватории Печорского моря и реализована с высоким пространственным разрешением ( $\sim 2500$  м).

Модель INMOM относится к классу сигма-моделей морской и океанической циркуляции. В ее основе лежит полная система уравнений гидротермодинамики океана в сферических координатах в приближениях гидростатики и Буссинеска [Дианский, 2013]. Прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости, потенциальная температура  $T$ , соленность  $S$ , отклонение уровня океана от невозмущенной поверхности, а также толщина и сплоченность морского льда. При численной

8 <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/#!description>

9 [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_sources.html](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources.html)

реализации в INMOM используется метод расщепления по физическим процессам и пространственным координатам [Zalesny et al; Marchuk et al., 2005], для которого реализован модульный принцип построения численной модели, где каждый из модулей отвечает за свой физический процесс формирования морской циркуляции.

Расчетная область модели охватывает акваторию всех морей западной Арктики России - Баренцево, Белое и Печорское моря. Это сделано для того, чтобы учесть течения Баренцева моря, а также водообмен Печорского моря с Карским через Карские Ворота, влияющий на циркуляцию вод Печорского моря.

Сеточная область адаптированной модели реализована с равномерным разрешением с шагом по пространству около 2500 м по долготе и широте.

Сеточная область в модельной системе координат приведена на рисунке 25. Размеры сеточной области составляют  $927 \times 809$  узлов по модельной долготе и широте с 20 уровнями по вертикали. На эту область интерполированы все необходимые приповерхностные метеопараметры из региональной модели атмосферы WRF для расчета атмосферного воздействия в модели циркуляции INMOM.

Топография для модели морской циркуляции на основе модели INMOM (Рисунок 6.3) бралась на основе массива GEBCO, имеющего горизонтальное разрешение в 30 угловых секунд. Для акватории моря дополнительно использованы батиметрические карты для уточнения топографических особенностей исследуемого региона.

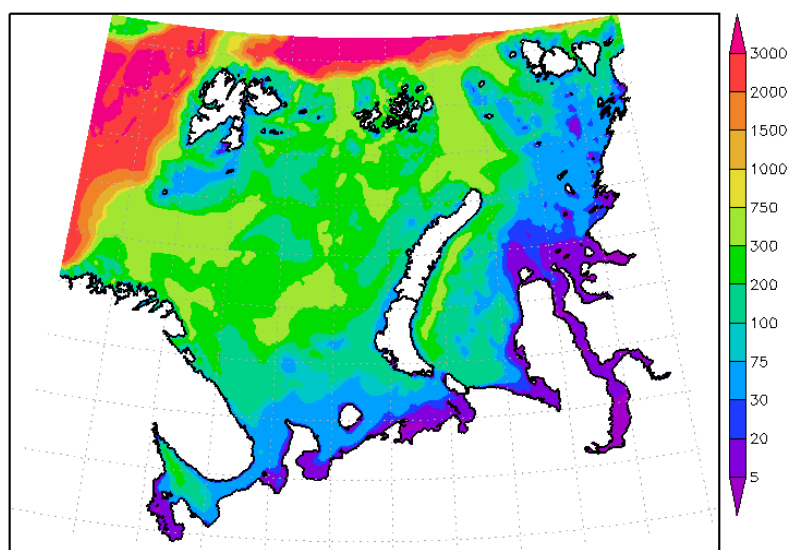


Рисунок 6.29. Топография модели морской циркуляции

Для задания начальных и граничных условий по температуре и солёности в модели циркуляции были подготовлены данные климатологии Левитуса [Boyer et al., 2013]<sup>10</sup>. Этот массив данных имеет пространственное разрешение  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  и содержит набор среднемесячных климатических карт температуры и солёности на различных горизонтах. На жидких границах задается климатический годовой ход температуры  $T$  и солёности  $S$  по обновленным данным NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, Национальное управление океанических и атмосферных исследований США).

<sup>10</sup> <http://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/woa13.php/>

Для подготовки начальных полей температуры и солености использовались также данные из массива Левитуса. На жидких границах также рассчитывались градиентные скорости по геострофическим соотношениям. Сток рек задавался по данным климатического года CORE [Large and Yeager, 2004] в виде псевдоосадков, сосредоточенных в акваториях, примыкающих к устьям рек.

Данные о поверхностной температуре взяты из массива данных OISST (Optimal Interpolation Sea Surface Temperature)<sup>11</sup>.

Для T и S на боковых границах и на дне ставится условие отсутствия потоков. На границах для скорости ставится условие непротекания, дополненное условиями свободного скольжения на боковых границах и квадратичного трения на дне [Дианский, 2013].

Для расчета приливных течений на жидких границах ставится условие изменения уровня под действием крупномасштабной приливной волны. Данные о приливных изменениях уровня берутся из открытых данных модели TPXO (TOPEX/Poseidon Global Tidal Model)<sup>12</sup> [Egbert and Erofeeva, 2002] с усвоением спутниковой альтиметрии с обеспечением пространственного разрешения порядка 25 км. Значения уровня моря на жидких границах рассчитываются на основе восьми основных приливных гармоник.

Для каждого расчетного года для обеих моделей эксперимент состоял в расчете полей циркуляции за целый год с 1 января по 31 декабря. Начальное состояние на 1 января для всех лет получалось одинаковым путем расчета на один месяц с декабрьской климатологии NOAA при атмосферном форсинге согласно так называемому нормализованному году из данных CORE [Large and Yeager, 2004].

---

<sup>11</sup> <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>

<sup>12</sup> <http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>

## 7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бортковский Р.С. Пространственно-временные характеристики барашков и пятен пены, образующихся при обрушении ветровых волн // Метеорология и гидрология. 1987. № 5. С. 68—75.
2. Бортковский Р.С. Тепло – и влагообмен атмосферы и океана при шторме // Л., Гидрометиздат, 1983. 160 с.
3. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том 6. Баренцево море. Вып. 3. Юго-восточная часть моря. Мурманск: МФ ААНИИ, МУГКС, 1984. 274 с.
4. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том 6. Баренцево море. Вып. 1,2. Гидрологические и гидрохимические условия, метеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 264 с.
5. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том 6. Баренцево море. Вып. 3. Юго-восточная часть моря. Мурманск: МФ ААНИИ, МУГКС, 1984. 274 с.
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том.1. Баренцево море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280с.
7. Дианский Н. А., Фомин В. В., Кабатченко И. М., Грузинов В.М. Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики // Арктика: Экономика и экология, № 1 (13), 2014.
8. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.
9. Зацепа С.Н., Дианский Н.А., Журавель В.И., Ивченко А.А., Коротенко К.А., Солбаков В.В., Становой В.В., Фомин В.В. Моделирование разливов нефти в море для планирования мероприятий по обеспечению экологической безопасности при реализации нефтегазовых проектов. Часть 1. Методология // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 4(106). С. 27 – 39.
10. Зацепа С.Н., Дианский Н.А., Журавель В.И., Ивченко А.А., Коротенко К.А., Солбаков В.В., Становой В.В., Фомин В.В. Моделирование разливов нефти в море для планирования мероприятий по обеспечению экологической безопасности при реализации нефтегазовых проектов. Часть 2. Особенности реализации прикладных задач // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. 1(107). С. 5 – 18.
11. Зацепа С.Н., Ивченко А.А., Журавель В.И., Солбаков В.В. «Исследование чувствительности псевдокомпонентной модели испарения нефти на поверхности моря к вариации параметров»// Процессы в геосредах, 2020, вып.2., стр. 662-674
12. Зацепа С.Н., Ивченко А.А., Журавель В.И., Солбаков В.В., Становой В.В. Анализ риска распространения аварийных разливов нефти на примере Обской губы Карского моря// Арктика: экология и экономика. 2014. № 3 (15). С. 30 – 45
13. Зацепа С.Н., Ивченко А.А., Коротенко К.А., Солбаков В.В., Становой В.В. О роли ветрового волнения в процессе диспергирования нефтяного разлива в море // Океанология. 2018. Т.58. №4. С. 556 – 564.
14. Зацепа С.Н., Ивченко А.А., Коротенко К.А., Солбаков В.В., Становой В.В. Феноменологическая модель диспергирования нефтяного разлива в море и параметризации некоторых процессов // Океанология. 2018. Т.58. №6. 843 – 853
15. Зацепа С.Н., Ивченко А.А., Солбаков В.В., Становой В.В. Прогнозирование распространения нефти и нефтепродуктов в случае аварийного разлива на морских акваториях (научно-методическое пособие). М.: АО «Финпол», 2018б. – 140 с., формулы, ил. ISBN 978 – 5 – 7637 – 0112 – 8

16. Зеленко А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Труды Государственного океанографического института. Исследования океанов и морей. –2014. –Вып. 215. –С. 90–101.
17. Иванов В.В., Лебедев А.А. Ведущие закономерности многолетней и сезонной изменчивости макроциркуляции атмосферы, метеорологических и ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря в конце XX – начале XXI столетий.// Тр. ААНИИ, т. 449, 2004
18. Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей (под ред. А.И. Данилова, Е.У. Миронова, В.А. Спичкина) // СПб, ААНИИ, 2004
19. Комплексные ледовые исследования для проектирования нефтеналивного терминала и нефтепровода на шельфе Печорского моря, в районе п. Варандей // Научно-технический отчет, ААНИИ, 2004
20. Лыков, А. В. (1967). Теория теплопроводности. Москва: Высшая школа
21. Нельсон-Смит А. Нефть и экология моря // Пер. с англ. под ред. Симонова А.И., М., Изд. "Прогресс", 1977 – 302 с.
22. Овсиенко С.Н., Ивченко А.А., Зацева С.Н., (2010) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010612856 «Модель прогноза/расчета распространения и трансформации аварийного разлива нефти в море (SPILLMOD)»
23. Озмидов Р.В. Диффузия примеси в океане. Л.: Гидрометиздат, 1986. 300 с.
24. Патин С.А. нефть и экология континентального шельфа: в 2-х т. 2-е изд. переработанное и дополненное. Т.1: Морской нефтегазовый комплекс: состояние, перспективы, факторы воздействия. – М., Изд-во ВНИРО, 2017, 326 с.
25. Патин С.А. Нефтяные разливы и их воздействие на морскую среду и биоресурсы. – М., Изд-во ВНИРО, 2008, 508 с.
26. Струков Б.С., Зеленко А.А., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования характеристик ветрового волнения и результаты ее испытания для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей // Информационный сборник № 40. Новые технологии, модели и методы гидрометеорологических прогнозов и результаты их оперативных испытаний. Под ред. А.А. Алексеевой. ФГБУ "Гидрометцентр России". М., 2013. – С. 64–79.
27. Aamo O.M. Reed M. and Downing K. (1997). Oil spill contingency and response (OSCAR) model system: sensitivity studies. Proc 1997 International Oil Spill Conference. Blumberg, A.F., and G.L. Mellor. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Three-dimensional coastal ocean models, Coastal and Estuarine series, ed. Moores. 1987. V. 4. P. 1-16.
28. Belore R., Buist I. Sensitivity of oil fate model predictions to oil property inputs. // Proc. Of the 17th Arctic and Marine Oil spill Program (AMOP) Technical Seminar, 1994, Canada. 7 p.
29. Boyer, T.P., J. I. Antonov, O. K. Baranova, C. Coleman, H. E. Garcia, A. Grodsky, D. R. Johnson, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, T.D. O'Brien, C.R. Paver, J.R. Reagan, D. Seidov, I. V. Smolyar, and M. M. Zweng. World Ocean Database 2013, NOAA Atlas NESDIS 72, 209 pp., 2013
30. ITOPF TIP – 02 – Technical Information Papers, 2014 – ITOPF [2014, PDF] Fate of marine oil spill// <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/technical-information-papers/>
31. Izumiyama K., Uto S., Narita S., Tasaki R. Effects of Interfacial Tension on the Spreading of Oil under an Ice Cover // Proc. of the 14th Int. Symposium on Ice. Potsdam, New York, USA. — [S. 1.], 1998. — P. 419—426.

32. Konno, A, and Izumiyama, K, (2002). “On the Relationship of the Oil/Water Interfacial Tension and the Spread of Oil Slick under Ice Cover.” Proc 17th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, pp 275-282.
33. Large, W., Yeager, S., 2009. The global climatology of an interannually varying air–sea flux data set. *Clim Dyn*, V. 33, P. 341-364.
34. Mackay D., Buist I., Mascaraenas R., Paterson R. Oil spill process and models. // Report – EE8. University of Toronto. Report to Environment Protection Service. Ottawa. Ontario. Canada. 1980. 93p.
35. Marchuk G.I., Rusakov A.S., Zalesny V.B., Diansky N.A. Splitting Numerical Technique with Application to the High Resolution Simulation of the Indian Ocean Circulation // *Pure appl. geophys.* 2005. V. 162. P. 1407–1429.
36. Nakamura, Y., Hayakawa N. Modelling of thermal stratification in lakes and coastal seas // *Hydrology of Natural and Manmade Lakes (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991)*. IAHS Publ. 1991. № 206
37. Niu H., R. Yang, Y. Wu, and K. Lee Modelling the Effects of Chemical Dispersant on the Fate of Spilled Oil: Case Study of a Hypothetical Spill near Saint John, NB // Proc. The 2014 International Conference on Marine and Freshwater Environments (iMFE) August 6-8, 2014, pp.1-11
38. Okubo, A., 1971. Oceanic diffusion diagrams. *Deep-Sea Res.* 18, 789–802.
39. Pacanovsky R.C., Griffies S.M. The MOM 3.0 Manual. Geophysic Fluid Dynamics Laboratory. NOAA, Princeton, USA, 2000, 680 p.
40. Phillips O.M. Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind – generated gravity waves// *J. Fluid Mech.*, 1985. V. 156. P. 505 – 531.
41. Saha S. et al., 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* –2010. –Vol. 91. –P. 1015–1057. doi: 10.1175/2010BAMS3001.1.
42. Skamarock W.C.. A Description of the Advanced Research WRF, Version 3 - NCAR Technical Notes, 2008.
43. Stramska M., Petelski T. Observations of oceanic whitecaps in the north polar waters of the Atlantic // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 2003. V. 108. № C3. doi:10.1029/2002JC001321. 10 p
44. Strukov B.S., Zelenko A.A., Resnyansky Yu.D., Martynov S.L. Verification of the Wind Wave Forecasting System for the Black, Azov and Caspian Seas // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. Ed. by A. Zadra. Report No. 42. May 2012. WCRP Informal Report No. 5/2012. p. 08-05–08-06.
45. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276. –2009. –P. 1–194 + Appendices [Available at <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>].
46. Wilkinson, J.P., Wadhams, P., McPhail, S.D. 2007. Modelling the Spread of Oil Under Fast Ice Using Threedimensional Multibeam Sonar Data. *Geophys. Res. Letters*, 34, L22506.
47. Zalesny V.B., Marchuk G.I., Agoshkov V.I., Bagno A.V., Gusev A.V., Diansky N.A., Moshonkin S.N., Tamsalu R., Volodin E.M. Numerical simulation of large-scale ocean circulation based on the multicomponent splitting method // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling.* 2010. V. 25. № 6. P. 581-609.
48. Zalesny V.B., Diansky N.A., Fomin V.V. et al. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // *Russian J. Numer. Anal. Math. Modelling.* 2012. V. 27. N1, P. 95-111.
49. Zeinstra-Helfrich, M., Koops, W., Murk, A.J., 2016. How oil properties and layer thickness determine the entrainment of spilled surface oil. *Mar. Pollut. Bull.* 110, 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.063>.



