

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

Федеральное Агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

(РГГМУ)

УДК 551.467.3

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по НР, к.г.н.,  
профессор В.Н.Воробьев

\_\_\_\_\_ 2007 г.

О Т Ч Е Т  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Физико-химические аспекты мониторинга природной среды  
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ ТРАНСПОРТИРОВКИ УГЛЕВОДОРОДОВ

(промежуточный)

Шифр: госбюджетный

Зав. кафедрой,  
научный руководитель  
канд. физ.-мат.наук

А.П.Бобровский  
\_\_\_\_\_ 2007 г.

Санкт-Петербург, 2007

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель, доцент, канд. физ.-мат. наук,	А.П.Бобровский (1-5)
Профессор, докт. физ.-мат. наук	В.И.Биненко (1-5)
Профессор, докт. физ.-мат. наук	А.В.Логинов (1-5)
Доцент, канд. физ.-мат. наук	Т.Ю.Яковлева (1-5)
Доцент, канд. физ.-мат. наук	А.Л.Скобликова (1-5)
Доцент, канд. физ.-мат. наук	Н.В.Дьяченко (1-5)
Доцент, канд. тех. наук	М.М.Белов (1-5)
Доцент, канд. физ.-мат. наук	М.А.Мамаев (1-5)
Доцент, канд. физ.-мат. наук	А.В.Бармасов (1-5)
Доцент, канд. физ.-мат. наук	В.Г.Сыромятников (1-5)
Старший преподаватель	В.В.Косцов (1-5)
Старший преподаватель	А.М.Бармасова (1-5)

## РЕФЕРАТ

Отчет 27 с., 7 рис., 5 табл., 24 источника.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ, БЕЗОПАСНОСТЬ, НЕФТЬ, ПРИРОДНЫЙ ГАЗ, УГЛЕВОДОРОДЫ, МОНИТОРИНГ, ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ХИМИЧЕСКОЕ ОРУЖИЕ, ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА, БЕНТОСНЫЕ ОРГАНИЗМЫ, МУТАГЕНЫ, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ, СЕВЕРО-ЕВРОПЕЙСКИЙ ГАЗОПРОВОД.

Сделаны оценки экологических рисков транспортировки нефти и газа по Балтийскому морю, представлена часть собранной базы данных, в рамках использования ГИС MapInfo, об экосистеме Балтийского моря в связи с проектом строительства Северо-Европейского газопровода (СЕГ), рассматриваются возможные методы мониторинга акватории моря с целью поддержания устойчивого развития Балтийской морской транспортной системы и экологической безопасности моря.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
СОКРАЩЕНИЯ .....	.5
ВВЕДЕНИЕ .....	.6
1 ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ОБОБЩЕНИЯ .....	.7
2 ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК .....	.8
3 СЕВЕРО-ЕВРОПЕЙСКИЙ ГАЗОПРОВОД И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ .....	.10
4 СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТРАНСПОРТИРОВКИ УГЛЕВОДОРОДОВ .....	.19
5 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ НЕФТЕПЕРЕВОЗОК ПО БАЛТИЙСКОМУ МОРЮ .....	.20
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	.23
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	.24
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	.26
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	.27

## СОКРАЩЕНИЯ

СЕГ – 3 стр. – Северо-Европейский газопровод;  
ГИС – 6 стр. – Геоинформационная система;  
ОВОС – 7 стр. – оценка воздействия на окружающую среду;  
КС – 10 стр. – компрессорная станция;  
ПДК – 13 стр. – предельно-допустимая концентрация;  
ХО – 13 стр. – химическое оружие;  
ВВ – 13 стр. – взрывчатые вещества;  
ОВ – 13 стр. – отравляющие вещества;  
ИНС – 19 стр. – инерциальная навигационная система;  
ГСО – 19 стр. – гидролокатор секторного обзора;  
ГБО – 19 стр. – гидролокатор бокового обзора;  
БАСУ – 21 стр. – бассейновые управления Госморспасслужбы.

## ВВЕДЕНИЕ

Балтийское море в 21 веке испытывает всё возрастающее влияние техногенных факторов и, в частности, связанных с увеличением потока транзитных углеводородов из новых портов в Финском заливе (нефти до 60 млн. т), а также с уже начавшимся строительством сухопутной части Северо-Европейского газопровода (СЕГ), а затем уже и по дну моря от бухты Портовая вблизи Выборга (Россия) до г. Грайфсвальд (Германия) с пропускной способностью до 55 млрд. м<sup>3</sup>/год, а потом по суше - до Нидерландов. Общая протяжённость СЕГ до Германии будет около 2500 км, из них морская часть трассы 1200 км. Планируется довести одну из ее веток после 2010 г. до Англии. Нефть и природные газы обеспечивают в настоящее время более 60 % потребностей мировой энергетики, но они же, попадая в окружающую среду в процессе добычи, транспортировки, переработки и хранения оказывают негативное воздействие на экосистему. Поэтому среди многочисленных техногенных факторов негативного воздействия на природу нефть занимает одно из ведущих мест, попадая в окружающую среду как в процессе добычи, транспортировки, переработки, хранения и использования нефтепродуктов, так и в результате аварийных разливов нефти. Нефть содержит не менее 1000 (по некоторым данным более 2000) индивидуальных веществ, большая часть которых токсична для подавляющего большинства представителей животного мира. Токсичные компоненты нефти и получаемых из нее продуктов, попав в живой организм, способны нарушить его нормальную жизнедеятельность на молекулярном, биохимическом физиологическом и общеорганизменном уровнях. Среди компонентов нефти есть мутагены, вызывающие изменения генома, - аппарата, отвечающего за наследственность клетки и организма, канцерогены, индуцирующие раковые опухоли, есть вещества, влияющие на биосинтез жизненно необходимых соединений, есть химические соединения, нарушающие нормальное деление клеток, эмбриогенез, рост, дыхание, размножение, иммунную активность и вообще способность к жизнедеятельности, а ведь вдоль Балтийского побережья живут и работают около 85 млн. человек. При этом возникает целый ряд экологических рисков, знание которых вместе с данными соответствующего мониторинга могут обеспечить приемлемую экологическую безопасность моря [1- 3].

Поэтому цель настоящей работы связана с:

- оценками экологических рисков, связанных с транспортировкой углеводородов в Балтийском море с использованием расчетного модуля по оценке экологического риска и экономического ущерба от возможных разливов углеводородов, встроеного в геоинформационную систему (ГИС);
- необходимостью в рамках ГИС MapInfo создать географически привязанную базу данных об экосистеме Балтийского моря;
- определением основных задач экологического мониторинга трасс транспортировки углеводородов;
- использованием возможностей ГИС-технологий для оптимизации мероприятий по ликвидации последствий возможных аварий при добыче, транспортировке и перевалке углеводородов.

## 1 ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ОБОБЩЕНИЯ

Объектом исследования является анализ данных об экосистеме Балтийского моря, особенно, в районах интенсивного судоходства и транспортировки углеводородов; а также информации о состоянии акваторий в местах нефтеналивных терминалов и добычи нефти; доступные сведения о захороненном после 2-ой мировой войны химическом оружии, взрывчатых веществах; данные об авариях и инцидентах, связанных с загрязнением моря углеводородами. Последние были использованы для оценки экологических рисков, связанных с возможными загрязнениями окружающей среды в районе добывающей платформы или объектов транспортировки углеводородов.

Создание базы данных об экосистеме Балтийского моря на основе мониторинга, с архивацией последних на картографическом фоне, с использованием расчётных модулей (не только по расчёту экологических рисков, но и возможных полей загрязнения акваторий нефтепродуктами, вероятности этих событий, поражающего действия углеводородов при тех или иных авариях, экономического ущерба от них и т. п.) на основе геоинформационных технологий, в данном случае на основе ГИС MapInfo (версия 7.5). Использование исходных данных с помощью электронных карт, атрибутивная и расчётная часть по отношению к имеющейся базе данных, наряду с прогностическим блоком ГИС – всё это может облегчить принятие соответствующих решений по ликвидации последствий аварий, связанных с углеводородами.

Другим важным объектом исследования является оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС), связанную с реализацией проекта строительства Северо-Европейского газопровода в Балтийском море, а также обеспечение экологического сопровождения и экологической безопасности СЕГ и соответствующих акваторий моря. Организация системы мониторинга окружающей среды на разных этапах строительства СЕГ также является важной составляющей, призванной обеспечить минимизацию экологического риска и возможного ущерба морской экосистемы и бентосных организмов разного уровня вдоль будущей трассы СЕГ. Таким образом, методика обобщения имеющихся данных об экосфере и техносфере, связанная с транспортировкой углеводородов, реализуется на основе ГИС-технологий, которые предполагает оперативное использование их для практического использования.

## 2 ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК

Анализ экологической безопасности в соответствии с Российским законодательством необходимо строить на основе концепции приемлемого риска. Риск является прогностической оценкой вероятности неблагоприятного исхода. Количественная оценка риска “ $R$ ” всех выше перечисленных ситуаций связана с частотой реализации опасностей, то есть с отношением числа тех или иных неблагоприятных последствий “ $n$ ” к их возможному числу за определённый период. Так, в 2001 году умерло 2,058 тыс. россиян из 145 млн., тогда индивидуальный риск, сопряжённый с проживанием в России,

$$R = n/N = 2,058 \cdot 10^6 / 1,45 \cdot 10^8 = 1,42 \cdot 10^{-2} \text{ в год.} \quad (2.1)$$

Индивидуальный риск гибели человека на производстве, в дорожно-транспортном происшествии можно посчитать таким же способом, при той же нормировке на “ $N$ ” и “ $R$ ” уже будет меньше на порядки величины  $R$ . Риск гибели человека в год по неестественным причинам по территории России составляет  $(1 - 1,7) \cdot 10^{-3}$ , в том числе от убийств –  $6 \cdot 10^{-5}$ , самоубийств  $1,9 \cdot 10^{-4}$ , в ДТП –  $2,7 \cdot 10^{-4}$ .

В работах [3, 4, 14] значения приемлемого уровня индивидуального риска для персонала предприятий –  $1 \cdot 10^{-5}$ , для населения региона  $1 \cdot 10^{-6}$ . Максимально приемлемым уровнем риска гибели обычно считается величина “ $R$ ” –  $10^{-6}$  в год. Часто риск поражения человека или какого-либо объекта “ $R_{пор}$ ” =  $R \cdot P_n$  – определяется как произведение частоты какого-либо события “ $R$ ” на вероятность определённой степени поражения  $P_n$ , для которого вычисляется риск. Так вероятности аварий в техносфере можно разделять на расчётные и реальные. Стержнем концепции экологической безопасности в мире признана теория экологического риска. Экологическую опасность можно уменьшить, но нельзя устранить полностью.

Для биоты и человека, в частности, экологический риск определяется потенциально возможным нарушением тенденций развития природно-антропогенных и чисто антропогенных систем, при котором изменения состояний будут неблагоприятны для жизнедеятельности и могут повлечь те или иные бедствия и даже экологические катастрофы. Если природно-экологический риск представляется естественным состоянием эволюционирующих геосистем, то антропогенно-экологический риск является порождением самого человека, чаще всего – вследствие непреднамеренных действий. Обе составляющие экологического риска важны для человечества, особенно когда по проявлениям и последствиям они совпадают или провоцируют друг друга.

Количественная оценка экономического ущерба  $R_e$  (руб./год), связанная с экологическим риском, может быть определена с использованием следующего уравнения:

$$R_e = R \cdot Y, \quad (2.2)$$

где  $R$  – величина экологического риска, 1/год;

$Y$  – ущерб в рублях.

В тоже время экономический ущерб морской среде вследствие возможного разлива нефти может быть определен по методике [9] с учетом нормативов [10]:

$$Y = 5 N_{БВ} K_{ЭВ} M_v \text{ руб.}, \quad (2.3)$$

где 5 – повышающий коэффициент, учитывающий сверхлимитный выброс загрязняющих веществ;

$N_{\text{БВ}}$  - базовый норматив платы за сброс нефти в поверхностные водные объекты;  
 $N_{\text{БВ}} = 27550$  руб/т [10];

$K_{\text{ЭВ}}$  - коэффициент экологической ситуации и экологической значимости водных объектов;  $K_{\text{ЭВ}} = 2,04$ ;

$M_v$  - масса нефти, принимаемая за загрязнение водных объектов;

с учётом того, что в результате проведённых мероприятий плёночная нефть полностью удалена, рассчитывается по формуле:

$$M_v = 5,8 \cdot 10^{-3} M_p (C_n - C_{\text{ф}}), \quad (2.4)$$

где  $M_p$  - масса нефти, разлитой по поверхности водного объекта, т;

$C_n$  - концентрация насыщения воды нефтью,  $C_n = 26$  г/м<sup>3</sup>;

$C_{\text{ф}}$  - фоновое значение концентрации растворённой и эмульсированной нефти в воде до аварии; принято  $C_{\text{ф}} = 0,05$  г/м<sup>3</sup> (норматив ПДК).

На основе вышеприведённых соотношений расчётное значение величины ущерба морской среде при разливе 1 т нефти составляет величину порядка 40 тыс. рублей [9 - 11].

В таблице 2.1 приводятся данные об экологических рисках, как о частоте событий в год для разных объектов, и связанных с загрязнениями углеводородами морских и прибрежных акваторий. На основе приведённых данных можно сделать вывод, что экологический риск для газопроводов, проложенных по морскому дну, меньше, чем в случае транспортировки нефтепродуктов или в случае их добычи.

Таблица 2.1 - Экологические риски, сопряжённые с некоторыми объектами на Балтийском море

Наименование объекта	Экологический. риск, 1/год
Добывающая платформа	$1,9 \cdot 10^{-3}$
Технологическая платформа	$5,6 \cdot 10^{-3}$
Плавучее нефтехранилище	$1,0 \cdot 10^{-3} - 1,0 \cdot 10^{-2}$
Нефтепровод (ЦТП – берег)	$2,8 \cdot 10^{-3}$
Акватория Финского залива / Балтийского моря	$2 \cdot 10^{-4}$ $10^{-4} - 2 \cdot 10^{-5}$
Газопровод	$10^{-5} - 10^{-6}$

Опыт двухгодичной эксплуатации глубоководного (до - 2150 м) газопровода «Голубой поток» (396 км по дну Чёрного моря от п. Джубга (Россия) до п. Самсун (Турция), а также газопровода в Северном море, подтверждают оценку приемлемого риска для газопроводов в пределах  $10^{-5} - 10^{-6}$ . Расчётная вероятность крупных аварий за год для трубопроводов длиной 1000 км -  $10^{-4}$ , а реальная, особенно, уже после многолетней эксплуатации  $10^{-2}$ . Самый крупный прорыв произошёл на нефтепроводе Харьяга-Уфинск в августе 1994 г. в республике Коми, когда пролилось от 70 до 100 тыс. т нефти, а в 1989 г. в результате разрыва газопровода и воспламенения газозооной смеси вблизи железнодорожного полотна, по которому следовали два пассажирских поезда, под Уфой погибло 575 человек и получили ожоги разной степени 118 человек. Поэтому, чтобы исключить такого рода экологические катастрофы и человеческие трагедии, необходимо соблюдать технические, технологические и экологические требования по соблюдению безопасности таких потенциально опасных (пожаровзрывоопасных) объектов, как трубопроводы [1 - 14].

### 3 СЕВЕРО-ЕВРОПЕЙСКИЙ ГАЗОПРОВОД И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Проект строительства СЕГ разрабатывается с 1997 г., но только в 2006 г. приступили к строительству сухопутной его части от бухты Портовая вблизи г. Выборга в сторону г. Грязновец и далее до Южно-Русского нефтегазового месторождения с общей протяжённостью 920 км. Протяжённость двух ниток морской части газопровода по дну Балтийского моря должна составить 1200 км и ещё порядка 400 км по Германии для подключения к основной газонесущей сети Европы. Для сооружения газопровода приняты стальные трубы класса прочности К60 толщиной в 36 мм с наружным трехслойным антикоррозионным покрытием толщиной 6,0 мм и внутренним эпоксидным покрытием, и всё это будет армировано слоем бетона толщиной в 8 – 10 см. Возможны два варианта прокладки СЕГ напрямую или с промежуточной компрессорной станцией (КС), построенной на металлической платформе, на банке вблизи о. Гогланд. В районе бухты Портовая будет построена КС мощностью в 425 МВт, что позволит перекачивать 55 млрд м<sup>3</sup> природного газа. Компрессорные станции для перекачки газа должны поддерживать в двух нитках трубопровода высокое давление (расчёт по формуле Пуазейля) до 25 МПа. Для безопасного отсечения участков газопровода СЕГ, в случае возникновения на них аварий в процессе эксплуатации будут использоваться в качестве запорно-отключающей арматуры на магистрали шаровые пневмогидравлические краны, а также линейные краны с дистанционным телемеханическим управлением. В случае возникновения экстремальных ситуаций вдоль трассы СЕГ предусмотрена возможность безаварийной остановки технологического процесса с использованием системы автоматизированного управления транспортом газа. Основные характеристики природного газа и опасности, связанные с его воспламенением и удушающим действием, приведены в таблице 3.1.

С целью повышения уровня экологической безопасности СЕГ должны быть заглублены, уложены в траншеи в потенциально опасных мелководных местах дна Балтийского моря, а для самого трубопровода для обеспечения устойчивости положения газопровода от всплытия предусматривается его балластировка утяжелителями охватывающего типа.

Таблица 3.1 - Основные характеристики природного газа

Природный газ (горючий, без запаха)	Основной компонент (свыше 96 %)	Примеси (3,7 - 17,8 % в смеси с воздухом)	ПДК (ОБУВ) Пороговая Токсодоза мг/м <sup>3</sup>	Главные опасности	Нижний конц. предел воспламенения % (об)
СН <sub>4</sub> +следы С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub> , С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> , СО <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , С <sub>2</sub> -С <sub>4</sub> 4-й класс опасности	СН <sub>4</sub> метан Н-Н-С-Н- Н молярная масса - 16,04 кг/кмоль Плотность при 20 °С, 3 0.659 кг/м <sup>3</sup>	Этан (С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub> ), Пропан (С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> ), н-Бутан(С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub> ), н-ПентанС <sub>8</sub> Н <sub>12</sub> ), Изопентан, Азот (N <sub>2</sub> ), Углекислый газ	50 >54,0	1. воспламенение газа 2. удушение при 10 – 20 %-м снижении содержания O <sub>2</sub> во вдыхаемой смеси	5.28

По сравнению с сухопутными трубопроводами, морские отличаются существенно меньшей взрыво- и пожароопасностью при эксплуатации в связи с отсутствием в воде большого количества кислорода. Однако, отсутствие возгорания при утечке из подводного трубопровода еще не является свидетельством экологической безопасности данного объекта. Например, природный газ, истекающий из поврежденного трубопровода, поднимается вверх и образует над поверхностью акватории ядовитое облако, которое разносится ветром. Всплытие газа происходит в виде двухфазной струи, состоящей из отдельных пузырей, которые образуют на поверхности воды подобие "кипящего слоя" с диаметром до 100 м. На шельфе - оно меньше, но на нем газ при утечке (при гильотинном разрыве трубы) может образовывать газодляные фонтаны высотой до 60 м. На глубине свыше 100 м при гильотинном разрыве трубы фонтанов не образуется.

В случае укладки трубопроводов с заглублением в грунт траншея роется в рыхлых грунтах (несколько метров шириной и глубиной) и образуется большое количество взвеси. Это одно из главных воздействий прокладки трубопроводов по морскому дну. Из других видов воздействий следует отметить следующие:

- изменение морфологии и распределения осадков за счет физического присутствия труб и рытья траншеи;
- изменение состава донных биоценозов за счет биообрастания, если труба лежит на поверхности;
- препятствие для миграции подвижных бентосных форм, если труба лежит на поверхности дна;
- шумовое, термическое и электромагнитное воздействие.

Очевидно, наиболее сильные вредные воздействия при прокладке морских трубопроводов проявляются для бентосных форм, в частности, в районах нерестилища, например, трески в Балтийском море. На рисунках 3.1 и 3.2 на основе использования ГИС MapInfo (версия 7.5) представлена карта-схема СЕГ, а также основные нерестилища, показаны направления нерестовых миграций трески и места аварий судов с разливом нефтепродуктов на примере 2002 - 2004 г. по данным [1 - 10].

Среднее количество инцидентов в год, связанных с судовождением,  $60 \pm 3$  (из них на столкновения судов приходится  $8 \pm 2$ ). Как видно из рисунка 3.2, наибольшая плотность инцидентов с судами имеет место в прибрежной зоне, вблизи портов и в проливе Каттегат (одновременно в море может находиться около 2000 больших судов).

Статистический риск таких аварий может удвоиться к 2015 г., что будет связано, как с ростом числа судов в Балтийском море, так и удвоением объёмов перевозимой нефти. Хотя следует отметить, что загрязнение Балтийского моря во многом определяется вкладом вод впадающих в него 250 рек, несущих влияние промышленной и сельскохозяйственной деятельности более 80 млн. людей, проживающих в зоне вокруг Балтийского моря.

На рисунках 3.3, 3.4 и 3.5 представлены батиметрические характеристики Балтийского моря - глубины и ледовые условия, а также данные о вертикальных и горизонтальных профилях солёности, содержания кислорода и сероводорода в основных частях Балтийского моря.

Как видно из рисунка 3.3, глубина дна Балтийского моря может достигать 459 м, при средней глубине порядка 86 м. Данные о вероятности становления льда в зимнее

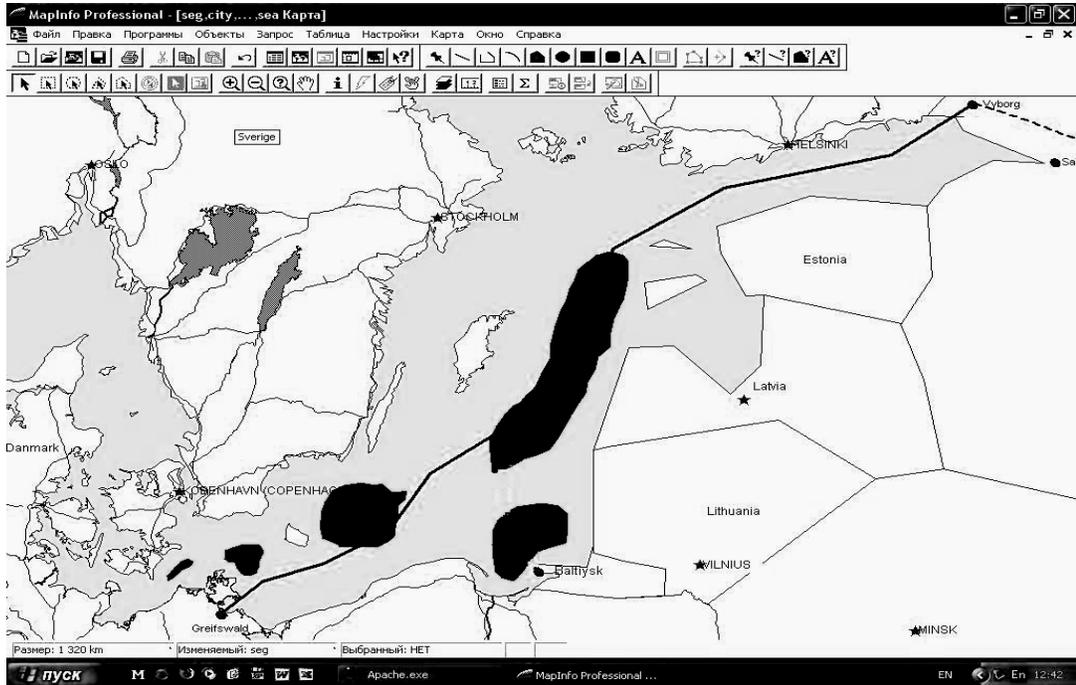


Рисунок 3.1 - Тематическая карта трассы СЕГ на примере использования ГИС MapInfo.  
 Основные нерестилища (тёмные пятна).

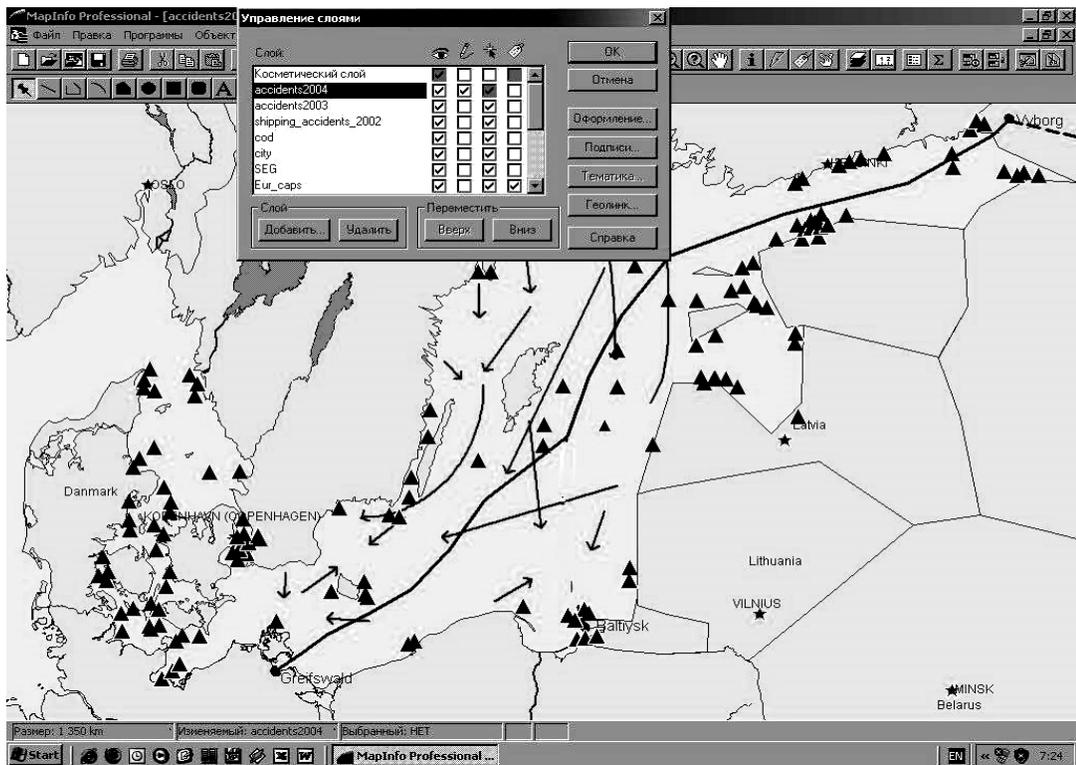


Рисунок 3.2 - Тематическая карта трассы СЕГ на примере использования ГИС MapInfo.

Стрелками показаны направления нерестовых миграций трески, места аварий судов с разливом нефтепродуктов (▲) на примере 2002 - 2004 г.

время свидетельствуют о дополнительных трудностях проводки судов, особенно в Финском заливе.

Данные, представленные на рисунках 3.4 и 3.5, свидетельствуют об относительно слабой солёности вод Балтийского моря (особенно его поверхностных вод, что связано с особенностью географического положения моря, окружённого со всех сторон сушей). По этой же причине морская вода не в достаточной степени обогащена кислородом и подвержена эвтрофикации. Водообмен Балтийского моря с открытым Северным морем осуществляется через узкие и неглубокие проливы между Швецией и Данией.

В случае разрыва газопровода негативные последствия (ПДК метана в морской воде величина порядка 0,01 мл/л) будут складываться из отравляющего воздействия как природного газа, проходящего через верхние слои воды, где встречаются ранние стадии развития рыб, так и увлекаемого им из анаэробной зоны к поверхности сероводорода.

Безопасный для пресноводных рыб уровень содержания сероводорода в воде, приводимый в иностранной литературе, составляет 0,002 мг/л. Гибель молоди и взрослых рыб будет происходить в водных массах с концентрацией метана в 0,7 - 1,4 мг/л при экспозиции в течение десятков часов.

При разрыве газопровода на шельфе негативное воздействие природного газа на ранние стадии развития рыб будет усилено мощным гидродинамическим ударом, который возникнет при залповом выбросе перекачиваемого под большим давлением газа.

Другим фактором негативного воздействия разрыва газопровода на ихтиопланктон будет повышение концентраций взвеси, образующейся при взрыве. Это воздействие сходно с воздействием при строительстве, но более кратковременно.

Другая важная проблема прокладки СЕГ по дну Балтийского моря связана с захоронениями химического и обычного оружия (ХО и ВВ - взрывчатых веществ), осуществлённого по решению союзников после окончания 2-ой мировой войны. Это было не вполне продуманное решение и его последствия являют пример экологического терроризма по отношению к экосистеме Балтийского моря и к людям, которые там проживают и работают [4 - 6]. Всё это было захоронено, как в концентрированном виде, так и россыпью, в Балтийском море (в проливах Скагеррак и Каттегат, близ шведского порта Люсечиль, между датским островом Фюн и материком (рисунок 3.6). Всего в шести районах акваторий Европы американские и английские оккупационные войска затопили 302875 тонн отравляющих веществ (ОВ). Арсеналы ХО, обнаруженные советскими войсками в Восточной Германии были также затоплены в Балтийском море и включали:

- 71469 250-кг авиабомб, снаряжённых ипритом;
- 14258 250-кг и 500-кг авиабомб, снаряжённых хлорацетофеном и арсиновым маслом и 50-кг авиабомб, снаряжённых адамитом;
- 408565 артиллерийских снарядов калибра 75 мм, 105 мм и 150 мм, снаряжённых ипритом;
- 34592 химических фугасов по 20 кг и 50кг, снаряжённых ипритом;
- 10420 дымовых химических мин калибра 100 мм;
- 1004 технологических ёмкостей, содержащих 1506 тонн иприта;
- 8429 бочек, в которых находилось 1030 тонн адамсита и дифинилхлорарсина;

- 169 тонн технологических ёмкостей с ОВ, в которых находилась цианистая соль, хлорарсин, цианарсин и аксельарсин;

- 7840 банок циклона, который гитлеровцы применяли в 300 лагерях смерти для массового уничтожения пленных в газовых камерах.

Наибольшую опасность для живых организмов представляет иприт, который гидролизуется, соединяясь с водой, и образует токсичные вещества, сохраняющие свои свойства в течение достаточно длительного времени (рисунок 3.6). Свойства люизита аналогичны иприту, однако, люизит – это иприт, большая часть которого на морском дне лежит в виде кусков ядовитого студня. Иприт и люизит - мышьякоорганическое вещество, так что экологически опасны практически как все продукты его трансформации, так и возможности их переноса по трофическим цепям.

---

Рисунок 3.3 - Батиметрические характеристики Балтийского моря – глубины и ледовые условия.

Рисунок 3.4 - Данные о вертикальных профилях солёности, содержания кислорода и сероводорода в основных частях Балтийского моря, согласно [1].

Последствия выхода ОВ в морскую среду определяются соотношением двух факторов. Первым из них является скорость гидролиза ОВ в морской воде, вторым – интенсивность переноса ОВ (как примеси) течениями и при турбулентном рассеянии в неконсолидированном слое ила и в придонной морской воде. Так что строительство специальных саркофагов для затопленного ХО и использование иных мер по изоляции и нейтрализации ОВ есть насущная задача, решение которой должно обеспечить экологическую безопасность экосистемы Балтийского моря.

Экологические риски, сопряжённые с разрушением отдельных оболочек ХО, содержащих такие боевые отравляющие вещества, как: табун, различные разновидности иприта, люизита, фосгена (с начинкой отдельной единицы ХО в 20 кг), могут привести к зоне поражения по объёму от  $10^2$  до  $10^5$  м<sup>3</sup> при продолжительности действия от 0,3 до 11 часов.

## ГИДРОГРАФИЯ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ: ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ

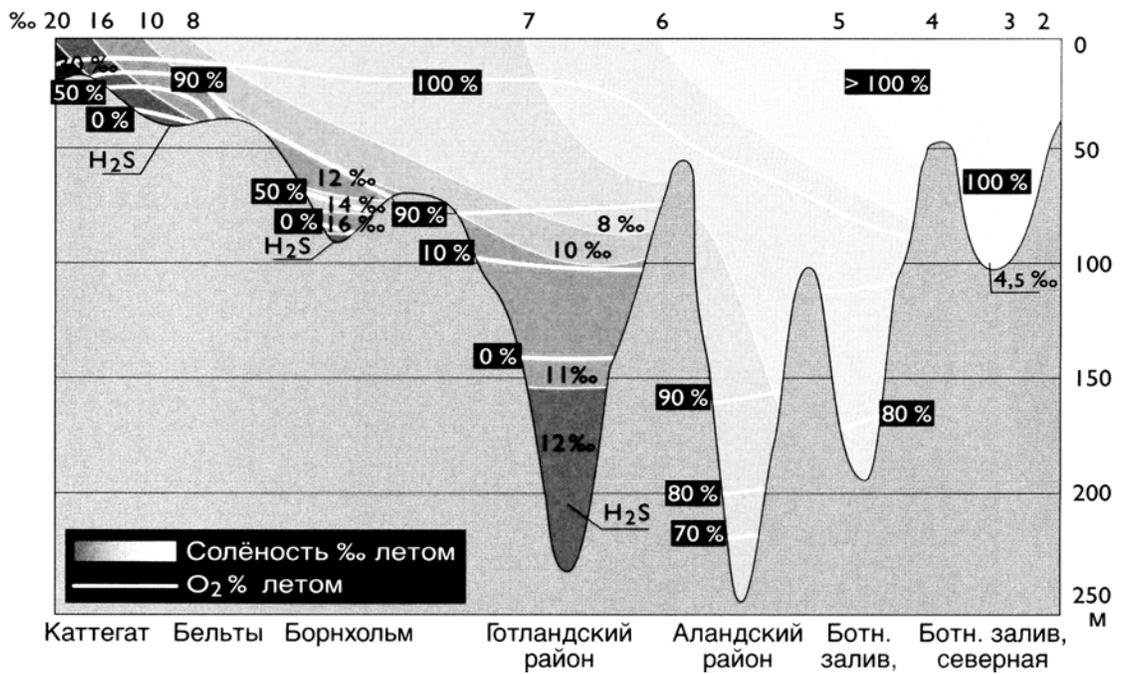


Рисунок 3.5 - Данные о горизонтальных профилях солёности, содержания кислорода и сероводорода в основных частях Балтийского моря, согласно [1].

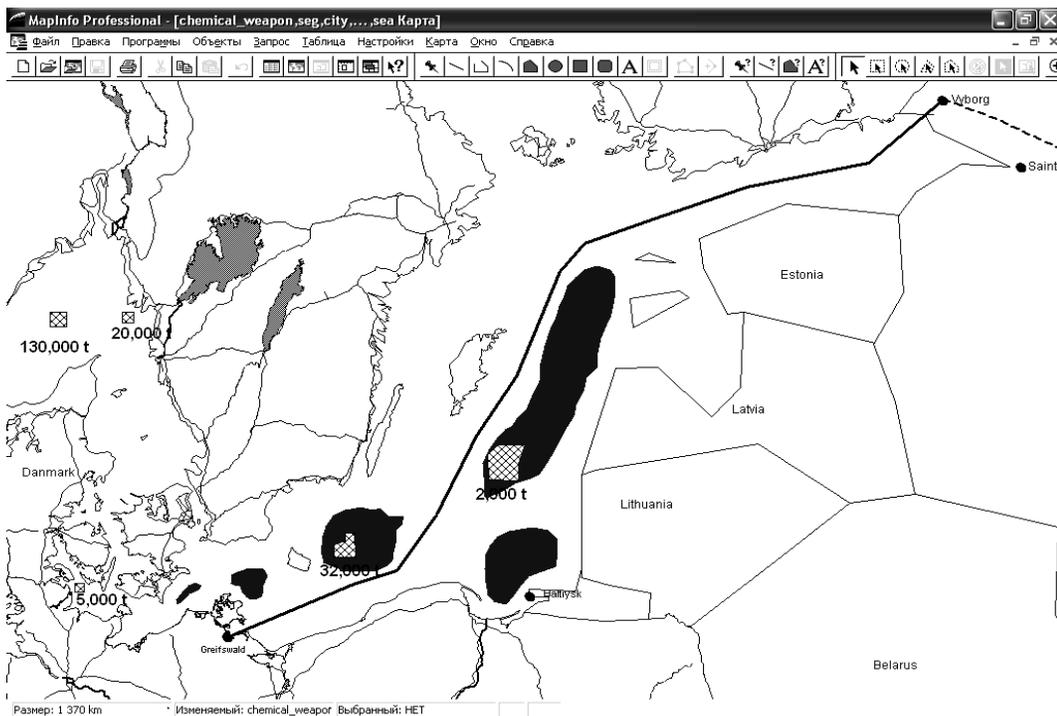


Рисунок 3.6 - Места захоронения старого ХО и ВВ в Балтийском море.

Зависимость протяженности токсичной зоны от скорости придонного течения и степени повреждения контейнеров: 1 –  $s = 0,1 \%$ , 2 –  $s = 100 \%$ , 3 – растекание ОВ в виде пятна представлена на Рис.3.7 согласно [13]. Формулы для расчёта токсических зон приведены в Приложении А

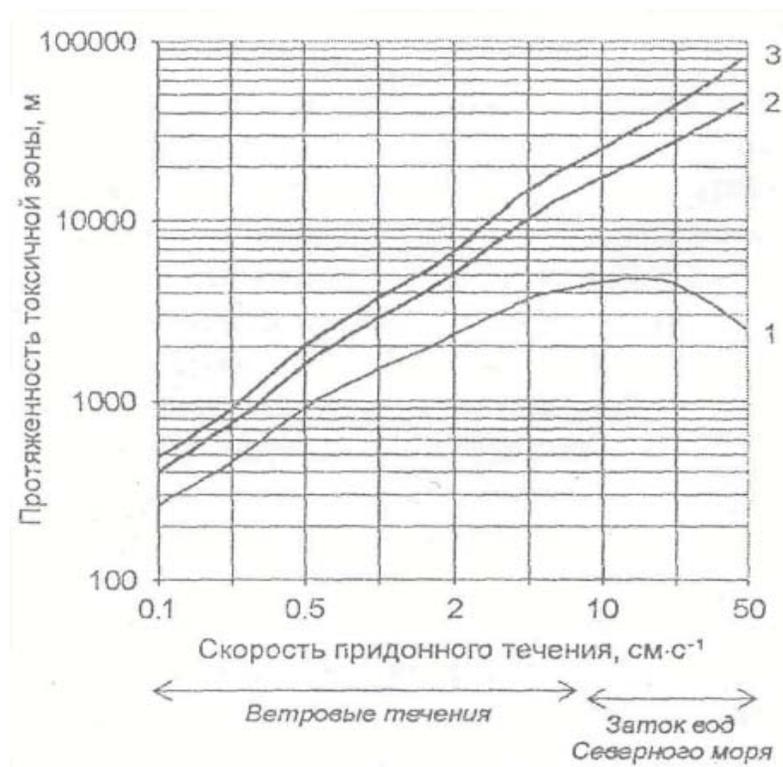


Рисунок 3.7 - Зависимость протяженности токсичной зоны от скорости придонного течения и степени повреждения контейнеров.  
1 –  $s = 0,1 \%$ , 2 –  $s = 100 \%$ , 3 – растекание ОВ в виде пятна.

Правда, следует отметить, что, по крайней мере по отношению к иприту, возможна его нейтрализация с помощью бактерий *Pseudomonas doudehoffii* [12]. Что касается ВВ, заключённых в гранатах, снарядах и авиабомбах, в зависимости от количества ВВ в них, при взрыве они могут иметь воздействие с радиусом поражения в пределах от 5 до 300 м [4, 13]. Придерживаясь принципа «не навреди», проектанты трассы СЕГ («Газпром», «Гипроспегаз», «Питер Газ») будут прокладывать её в зоне шириной 500 м вне пределов досягаемости этого оружия.

Всё это, наряду с геологическими особенностями дна Балтийского моря, с данными об основных маршрутах судоходства, (а это около 200 тысяч судов в год), вся информация регулярного мониторинга потенциально-опасных мест при транспортировке углеводородов, должна быть сосредоточена и заархивирована на основе ГИС-технологий, что могло бы быть использовано для анализа состояния экосистемы, а в случае чрезвычайных ситуаций позволило бы принимать управленческие решения по их ликвидации [4].

В случае разрыва трубопровода, в начальный период времени, если не произойдет воспламенения, то будут протекать процессы рассеяния выброса в окружающем пространстве с образованием зон загазованности. При объемных концентрациях газа от 5 до 15 % такие зоны становятся пожароопасными и могут в случае появления источника огня воспламениться с образованием вторичной волны избыточного давления и дефлаграционного пламени, представляющих определенную опасность для реципиентов, оказавшихся в пределах такой зоны. В случае отсутствия возгорания газовое облако со временем поднимается в верхние слои атмосферы и рассеивается. Рассеиванию облака способствует резкое убывание интенсивности выброса газа из концов разрушенного трубопровода, вследствие чего, уже в течение первых минут после разрыва, зона загазованности, достигнув своих максимальных размеров, начинает быстро уменьшаться.

Наибольшую опасность представляют аварии с воспламенением газа в начальный период, то есть непосредственно после разрыва газопровода. При этом характер горения газа и масштабы воздействия пожара на окружающую среду зависят от большого числа и конкретного сочетания целого ряда факторов, к основным из которых относятся:

- рабочее давление газа, диаметр газопровода, место расположения разрыва;
- наличие и расположение разобщительной арматуры, а также возможности её перекрытия;
- способ прокладки трубопровода;
- общие размеры разрушения (линейный пробег трещины);
- характерные размеры (длина, ширина, глубина) и форма грунтового новообразования (траншея или котлован);
- свойства массива грунта;
- взаимное положение осей зафиксированных концов разрушенного трубопровода.

Проекты такого рода требуют субрегионального сотрудничества стран HELCOM с целью экспертизы, мониторинга и повышения стандартов экологической безопасности, в частности, судоходства и рыболовства в Балтийском море. Создание базы данных мониторинга об экосистеме в районе прохождения СЕГ на основе ГИС-технологий является важным компонентом такого сотрудничества, как научно-исследовательских институтов России, так и соответствующих структур HELCOM.

#### 4 СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТРАНСПОРТИРОВКИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Система мониторинга транспортировки углеводородов по морю и под водой может быть реализована, как на основе спутниковых средств дистанционного зондирования, самолётов-лабораторий, так и специализированных судов и подводных аппаратов (включая погружные буи, ПОА типа «Мир») с привлечением комплекса приборов для наблюдения и реализации управленческих решений по экологической безопасности морской экосферы [14,15]. Вся эта система комплексных измерений должна быть желательна четырёхмерной, то есть в пространстве трёх координат и времени, для чего весь аппаратный комплекс должен быть географически позиционирован, также как и объект исследования - либо на основе GPS, либо инерциальной навигационной системы (ИНС), корректируемой доплеровским лагом, для обеспечения точного курсоуказания и измерения параметров движения носителя научно-исследовательской аппаратуры. Инженерно-изыскательские работы, инженерно-геологические-химические-экологические исследования должны быть реализованы на основе соответствующего аппаратного комплекса. В таблице 4.1 приведен перечень некоторых целей и приборов, призванных решить поставленные задачи, как применительно к СЕГ, так и для обнаружения разливов нефти.

Таблица 4.1 - Основные цели и задачи, аппаратный комплекс мониторинга транспортировки углеводородов

цели и задачи	аппаратурный комплекс
определение положения (подвижки трубопровода), обнаружение и измерение провисов	телевизионная система, магнитогравиметрические датчики и электромагнитные устройства, акустический профилограф и гидролокатор секторного обзора, GPS
обнаружение обнажения трубопровода (толщина засыпки)	гидролокатор секторного обзора, ориентируемый (ГСО)
осмотр рельефа дна по сторонам трубопровода	гидролокатор бокового обзора (ГБО)
обнаружение посторонних предметов (камни, ХО, металл)	гидролокатор бокового обзора (ГБО)
обнаружение утечки транспортируемых веществ (газ, топливо и др.)	акустический профилограф, датчик метана, хелюминесцентный датчик определения ХПК, самолётный лидар для обнаружения углеводородов, GPS

Географически привязанные результаты мониторинга, архивированные на основе ГИС-технологий, могут позволить осуществлять оперативное принятие решений в случае аварийных ситуаций с углеводородами.

## 5 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ НЕФТЕПЕРЕВОЗОК ПО БАЛТИЙСКОМУ МОРЮ

Увеличение грузооборота через порты Финского залива и по Балтийскому морю возрастает стремительными темпами. После ввода в действие порта Приморск на Балтику стали заходить танкера дедвейтом до 150000 тонн с осадкой при загрузке свыше 15 метров. Для судов, следующих на юг от Готланда, граница глубоководного фарватера проходит по изобате 16 - 17 метров, что повышает вероятность посадки на мель. На сегодняшний день общий грузопоток через Финский залив уже превышает 80 миллионов тонн, из которых около половины приходится на нефть. Строительство же новых российских нефтяных терминалов на побережье Финского залива обеспечит положение, при котором, количество судозаходов увеличится примерно вдвое, грузооборот нефти через Финский залив увеличится к 2015 году в 3 раза и составит около 200 миллионов тонн нефти в год. С учетом того, что мировые перевозки нефти составляют 2,2 миллиардов тонн нефти ежегодно, на долю Балтийского моря будет приходиться почти 10 % всех объемов мировых перевозок, что приведет не только к увеличению интенсивности судоходства но и к значительному ухудшению экологической обстановки в регионе Балтийского моря. Такое бурное развитие танкерного судоходства на Балтике, согласно прогнозам группы TACIS, приведет к тому, что к 2015 году риск разливов нефти в количестве до 1000 тонн увеличится на 50 %, а разливов свыше 1000 тонн - на 25 %. Риск аварийных ситуаций наиболее высок при танкерных перевозках нефти. Вероятность крупных разливов нефти (более 150 т) при транспортировке по трубам и в процессе буровых работ снижается в два - четыре раза [7, 17 - 21].

Под оценкой риска разливов нефти в море понимается:

- выявление потенциальных источников разливов нефти;
- расчет объемов разливов нефти и их частоты;
- определение природных ресурсов и хозяйственных объектов, которые могут быть загрязнены в результате разлива нефти;
- разработка сценариев поведения нефти на поверхности моря, которые должны учитывать растекание нефти и ее выветривание в зависимости от гидрометеоусловий в месте разлива, протяженность возможного загрязнения береговой линии.

Результаты оценки риска являются базой для разработки мероприятий по снижению количества аварий и их последствий, затрат на их осуществление и принятия решения о целесообразности планируемого вида деятельности. Основная составляющая оценки риска – расчет объемов разливов нефти и их частота. Этот параметр является основным для систематизации чрезвычайных ситуаций в море и для расчета достаточности сил и средств ликвидации разливов [4, 7, 17 - 23].

Основными источниками разливов нефти являются грузовые операции на нефтяных терминалах, аварии танкеров, перевозящих нефть и нефтепродукты, незаконные эксплуатационные сбросы с судов нефтесодержащих отходов и аварии на буровых платформах. На рисунке 3.2 представлены инциденты с разливами нефти в Балтийском море, происшедшие в результате аварий судов и при грузовых операциях на нефтяных терминалах за 2002 - 2004 годах.

Согласно российскому законодательству в области реагирования на разливы нефти, принята следующая систематизация чрезвычайных ситуаций, связанных с разливами нефти в море:

– разлив локального значения – это разлив, для ликвидации которого достаточно сил и средств, находящихся на объекте или в непосредственной близости от него. Это разлив, не превышающий 500 т. Он ликвидируется собственными силами организации или силами и средствами взаимодействующих организаций, привлекаемых на договорной основе;

– разлив регионального значения – это разлив нефти, для ликвидации которого требуется привлечения сил и средств, находящихся в регионе. Обычно это разливы, не превышающие 5 тыс. т. Руководство операциями по их ликвидации возложено на бассейновые управления Госморспасслужбы – БАСУ. БАСУ также ликвидируют разливы нефти локального значения, если они произошли вне зоны ответственности организации, осуществляющей операции с нефтью, или эта организация не в состоянии ликвидировать разлив нефти собственными силами;

– разлив федерального значения – это разлив более 5 тыс. т и для его ликвидации требуется привлечение сил и средств других бассейнов или сопредельных государств.

Непосредственное руководство работами по сбору нефти в море возлагается на Федеральную службу морского и речного транспорта Минтранса России.

Основными источниками разливов являются грузовые операции на терминалах, при которых происходит разрыв шлангов, поломки грузовых устройств, переливы танков и повреждение грузовых танков при швартовых операциях. Согласно исследованиям ТАСИС [21], частота разливов нефти более 1 т при заходе судов на терминал может считаться равной  $5 \cdot 10^{-4}$ . При этом доля разливов в интервале 1 - 10 т составляет 0,79; в интервале 10 - 100 т – 0,17, в интервале 100 - 1000 т – 0,036, а более 1000 т – 0,008, то есть 96 % всех разливов на терминалах не превышает 100 т [19].

Таблица 5.1 - Вероятность вылива более 100 т нефти при авариях однокорпусных и двухкорпусных танкеров

Р разл./авар	Однокорпусные танкеры		Танкеры с двойным корпусом	
	Р разл.> 100т	Р разл.> авар.	Р разл.> 100т	Р разл.> авар
Посадка на мель	0,25	0,04	0,03	0,09
Столкновения	0,25	0,04	0,03	0,09
Повреждение конструктивных элементов	0,05	0,16	0,05	0,09
Пожар, взрыв	0,1	0,14	0,1	0,09

Таким образом, согласно статистике, на 100 тыс. заходов танкеров на терминале может произойти два разлива нефти массой 100 т и более. Исходя из этого, на терминале Приморск при достижении им проектной мощности 60 млн. т/год при отгрузке нефти в танкеры дедвейтом 120 тыс. т возможен один разлив в 400 лет объемом более 100 т.

Расчет частоты и размеров разливов нефти в результате аварий танкеров в море базируется на статистике ИМО, согласно которой частота аварий составляет (для морей с интенсивным судоходством): посадка на мель – 5,4 на 106 миль; столкновение – 1,9 на 106 миль; повреждение конструкции – 0,48 на 106 миль; пожар, взрыв – 0,063 на 106 миль [7, 19].

Таблица 5.2 - Расчётные средние объёмы разливов нефти

Порт	Объём перевозок,	Объём перевозок,	Средний объём разлива нефти, т
	в тыс. т	в тыс. т	
	2004 г.	2010 г.	
С.-Петербург	1 356	10 000	937
Приморск	44 565	52 000	2 500
Высоцк	1 515	14 000	1 250

Для расчета величины ущерба предварительно необходимо оценить объем возможных утечек (разливов) в результате потенциальных аварий. Последствия вероятных аварийных разливов в значительной мере будут определяться размерами зон распространения нефтепродуктов и степенью чувствительности к ним контактирующих компонентов окружающей среды: земель, водных объектов, воздуха.

Статистика свидетельствует, что основную часть попадающих в акватории Невы и Финского залива составляют поступления от речных вод со сбросами от предприятий – 28 %, и от балластных вод – 23 %. Это подсказывает и практика повседневной работы наших аварийных служб. Вместе с тем видно, что поступление нефтепродуктов из-за аварий судов составляет не более 5 – 10 %. Однако именно эти аварии становятся широко известными, поскольку в таких случаях на место аварии выливается тысячи тонн нефти, что приводит к катастрофическим последствиям [17 - 23].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали, что экологические риски, сопряжённые с проектом строительства СЕГ по дну Балтийского моря, на порядок ниже, чем в случае транспортировки нефти судами. Риск аварийных ситуаций наиболее высок при танкерных перевозках нефти. И, хотя природный газ менее опасен, чем нефть и её производные, но оба этих энергоносителя, при попадании в морскую среду, способствуют загрязнению, эвтрофикации, изменению трофических условий экосистемы Балтийского моря. Поэтому экологический мониторинг путей транспортировки углеводородов по Балтийскому морю должен носить комплексный и регулярный характер, при наличии постоянных постов автоматизированного контроля наиболее опасных мест трасс транспортировки нефти и газа.

Возможности ГИС-технологий на примере MapInfo были использованы для создания исходной базы данных об экосистеме Балтийского моря с модулем для расчёта экологических рисков и оценки возможного экономического ущерба от транспортируемых углеводородов, а также для оптимизации мероприятий по ликвидации последствий возможных аварий при добыче, транспортировке и перевалке углеводородов.

Обеспечение экологической безопасности флоры и фауны Балтики и морской экосистемы в целом должно осуществляться в рамках международного права и тесной кооперации стран Балтийского моря.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Балтийское море. Окружающая среда и экология / под ред. Е.Фурман, Р.Мунстерхулм, Х.Салеман, П.Вялипака, Хельсинки, ХЕЛКОМ.Printing: Digitone Oy.- 2002. – 39 с.
- 2 Биненко В.И. Экологические аспекты ухудшения здоровья людей. Экологическая химия . 2003. – т.12 ,вып.4. – с. 208 – 224.
- 3 Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. / М.: Наука, 2000. – 431 с.
- 4 Биненко В.И., Храмов Г.Н., Яковлев В.В. Чрезвычайные ситуации в современном мире и проблемы безопасности жизнедеятельности / СПб, полиграфический центр ИВТОБ СПбГПУ 2004 – 400 с.
- 5 Биненко В.И. Экологический терроризм. / Сборник научных трудов РГГМУ – «Проблемы теоретической и прикладной экологии» СПб. – 2005. – 120 - 130 с.
- 6 Растоскуев В.В., Шалина Е.В. Геоинформационные технологии при решении задач экологической безопасности / СПб.: ВВМ. – 2006. - 256 с.
- 7 Яковлев В.В. Нефть, газ, последствия аварийных ситуаций / СПб.: СПбГПУ. – 2003. – 414 с.
- 8 Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах (утв. Минтопэнерго РФ 01.11.1995г.) / М.: ТрансПресс. - 1996.
- 9 Нормативы платы за сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты. Утв. Постановлением Правительства РФ от 12.06.2003 г. № 344.
- 10 Туркин В. Оценка экологического риска добычи нефти на морском шельфе / Modeling and Analysis of Safety and Risk: Complex Systems. MASR 2004, June 22-25, Saint-Petersburg. – P. 430 - 433.
- 11 Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром» / СТО РД Газпром 39-1.10-084-2003. - М.: ОАО «Газпром».
- 12 Смирнова Н.Ф., Смирнов Н.П. Атлантическая треска и климат. / СПб.: Изд. РГГМУ. - 2000. – 222 с.
- 13 Гончаров В.К., Пимкин В.Г. Прогнозирование экологических последствий выхода в морскую среду ОВ из затопленного в Балтийском море старого химического оружия / Экологическая химия, 2000. – т. 9, вып.3. – с. 196 - 204.
- 14 Медведева Н.Г., Сухаревич В.И., Поляк Ю.М., Зайцева Т.Б., Гриднева Ю.А. Патент РФ № 2103357 “Способ биодegradации ипритсодержащих смесей, штамм бактерий Pseudomonas sp. 8-2 - биодegradатор иприта, штамм бактерий Pseudomonas doudoroffii 70-11 - биодegradатор иприта, штамм бактерий Corynebacterium sp. КЗБ - биодegradатор иприта”. / С 12 N 1/20, С 02 F 3/34; Научно-иссл. центр экол. безоп. РАН. - Заявл. 23.05.1996.
- 15 Kojima J., Kato Y., Asakawa K. Development of Autonomous Underwater Vehicle «Aqua Explorer2» for Inspection of Underwater Cables // MTS/IEEE, Oceans'97, Canada, 1997.
- 16 Агеев М.Д. Оснащение и управление АНПА при обследовании подводных трубопроводов / «Подводные технологии», 2005. - №1. – с. 68 - 72.
- 17 Березин И.К. Оптимизация природоохранных мероприятий при ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов (на примере акватории Санкт-Петербурга).

Проблемы риска в техногенной и социальной сферах. Снижение риска аварийных ситуации с нефтью и нефтепродуктами. / СПб., 2005. - 3 – 21 с.

18 Энциклопедия «Экометрия» /под ред. Л.К. Исаева: «Контроль химических и биологических параметров окружающей среды». – СПб.: «Союз», 1998. – 896 с.

19 Семанов Г.Н. ([http://www.securpress.ru/issue/Tb/2005\\_2/neft\\_razliv.htm](http://www.securpress.ru/issue/Tb/2005_2/neft_razliv.htm)) Разливы нефти в море и обеспечение готовности к реагированию на них.

20 Берковиц А.В., Биненко В.И. Оценка риска аварийных разливов нефти в акваториях Финского залива и реки Невы. / Материалы 8-ой межд. конференции «Акваторра -2005», СПб., 14 - 16 июня 2005 г., СПб.: «Рестэк», 2005. - с. 132 - 139.

21 Сборник тезисов VI Международного экологического форума «День Балтийского моря» / СПб.: «Изд. дом Герда», 2005. - 446 с.

22 Альхименко А.И. Аварийные разливы нефти в море и борьба с ними: учебное пособие для ВУЗов. / СПб: ОМ-Пресс, 2004. - 229 с.

23 Михрин Л.М. Предотвращение загрязнения морской среды с судов и морских сооружений. В 2 томах / Изд. «Судостроение», 2005. – 650 с.

24 Биненко В.И., Берковиц А.В. Экологические риски, связанные с транспортировкой углеводородов и безопасность Балтийского моря. / Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2006. - №3, 83 - 96.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

$$c(\xi, \eta, \zeta) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi} k_{y_0} {}^{2(2+n)}\sqrt{(2+n)^2 k_{z_0}^{2(1+n)} u_0^2 h_b^{4+n} \xi^{4+3n}}} \cdot \exp\left[-\ln 2 \frac{h_b \xi}{u_0 T_{1/2}}\right] \cdot \exp\left[-\frac{h_b \eta^2}{4k_{y_0} \xi}\right] \times$$

$$\times \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \exp\left[-\frac{[\zeta_c^{2+n} + (2k + \zeta)^{2+n}] h_b u_0}{(2+n)^2 k_{z_0} \xi}\right] \cdot \sum_{j=0}^{\infty} \left[ j! \Gamma\left(\frac{1+n}{2+n} + j\right) \right]^{-1} \cdot \left[ \frac{[\zeta_c(2k + \zeta)]^{2+n} h_b^2 u_0^2}{(2+n)^4 k_{z_0}^2 \xi^2} \right]^j \right\} +$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \exp\left[-\frac{[\zeta_c^{2+n} + (2k - \zeta)^{2+n}] h_b u_0}{(2+n)^2 k_{z_0} \xi}\right] \cdot \sum_{j=0}^{\infty} \left[ j! \Gamma\left(\frac{1+n}{2+n} + j\right) \right]^{-1} \cdot \left[ \frac{[\zeta_c(2k - \zeta)]^{2+n} h_b^2 u_0^2}{(2+n)^4 k_{z_0}^2 \xi^2} \right]^j \right\} \quad (1),$$

$$Q_m = 5.78 s \sqrt{D_m R_c^3 u_0 \zeta_c^n} c_w \quad (2),$$

$$\Omega_w(x, y) = k_z \partial_z c(x, y, z=0) = \frac{Q_m u_s}{4\pi k_s x^2} \cdot \exp\left[-\ln 2 \frac{x}{u_s T_{1/2}}\right] \cdot \exp\left[-\frac{y^2 u_s}{4k_s x}\right] \times$$

$$\left\{ \sum_{n=0}^{\infty} (z_c + 2nh_s) \cdot \exp\left[-\frac{(z_c + 2nh_s)^2 u_s}{4k_s x}\right] - \sum_{n=1}^{\infty} (z_c - 2nh_s) \cdot \exp\left[-\frac{(z_c - 2nh_s)^2 u_s}{4k_s x}\right] \right\} \quad (3),$$

$$\frac{\sqrt{6\pi} k_{y_0} {}^{2(2+n)}\sqrt{(2+n)^2 k_{z_0}^{2(1+n)} h_b^{-2n}}}{5.78 \sqrt{D_w R_c^2 u_0^{(1+n)/(2+n)} L_t^{(4+3n)/2} (2+n)}} \cdot \exp\left[\frac{\ln 2}{T_{1/2}} L_t u_0^{-1}\right] = \frac{c_w s}{c_t} \times \left\{ 1 + 2 \left[ \Gamma\left(\frac{1+n}{2+n}\right) \right]^{-1} \sum_{k=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{(2k)^{2+n} h_b^2 u_0}{(2+n)^2 k_{z_0} L_t}\right] \right\}$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### ВЫПИСКА из протокола № 4 заседания кафедры физики от 28.12.2007

Слушали: Отчет по научно-исследовательской работе по госбюджетной теме «Физико-химические аспекты мониторинга природной среды» в 2007 г.: «Экологические риски транспортировки углеводородов».

Постановили: Утвердить отчет кафедры физики по научно-исследовательской работе по госбюджетной теме «Физико-химические аспекты мониторинга природной среды» «Экологические риски транспортировки углеводородов».

Председатель заседания,  
заведующий кафедрой физики

А.П.Бобровский

Секретарь заседания  
Л.Н.Белова