МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Магистерская диссертация)

«МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В ВИДЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛИКА НА АКВАТОРИИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА»

Исполнитель: Хархордина Евгения Ивановна, студент группы ПО-М20-1-8

Научный руководитель: кандидат геогр. наук, доцент, Чанцев Валерий Юрьевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой____________________

(подпись)

кандидат геогр. наук

(ученая степень, ученое звание)

Лаптева Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«20» июня 2022г.

Санкт–Петербург

2022

Оглавление

Введение....3
1. Физико-географическое описание района....5
1.1 Общая информация....5
1.2 Циркуляция....6
1.3 Ветер....9
1.4 Разливы Нефти в Финском заливе....10
1.5 Основные порты и судоходство....14
1.6 Экологические последствия....17
2. Современные подходы к моделированию....23
2.1. Модель GNOME....23
2.2 MEDSLIK-II....27
2.3 MOHID Water....29
3 Формулировка модели....32
3.1 Рассмотрение пятна как единого образования....32
3.2 Криволинейная сетка....33
3.3 Уравнение мелкой воды для криволинейной сетки....34
3.4 Адвективно-диффузная составляющая....36
3.5 Течения и ветер....37
4 Численный эксперимент....39
4.1 Исходные данные....39
4.2 Первый эксперимент....39
4.3 Второй эксперимент....42
Список использованных материалов....50

Введение

Рассматриваемая проблема:

Разливы нефти ежедневно угрожают миллионам километрам береговой линии, речным системам, озерам и наземной среде обитания, особенно там, где происходит бурение, переработка и транспортировка нефти. Проблема управления разливами нефти во всем мире становится все более сложной и масштабной. Разливы нефти с танкеров являются примерами неблагоприятного воздействия большого количества нефти на водные и береговые экосистемы. Те разливы, которые ближе всего к берегу, как правило, оказывают наибольшее неблагоприятное воздействие на окружающую среду, поскольку нефть не успеет рассеяться до достижения берега и может значительно повлиять на чувствительные места обитания различных организмов. [1]

Актуальность работы

Разливы нефти происходят на нефтяных платформах, нефтеперерабатывающих заводах или нефтяных танкерах, которые попали в аварию или ‘очищают’ свои резервуары в океане. Нефть, достигающая побережья таким образом, влияет на различные экосистемы – открытые и защищенные песчаные пляжи, устья рек и скалистые берега – или остается в воде, чтобы в итоге осесть на морское дно в глубоких или мелководных водах.

Ущерб, причиняемый разливами нефти, различается в зависимости от химического состава нефти, площади поражения и применяемых очистных мероприятий. Организм, пострадавший от разлива нефти, будет более или менее чувствителен к загрязнению, в зависимости от его природы и жизненного цикла. Но помимо организма, непосредственно затронутого разливом, другие организмы могут косвенно подвергаться воздействию из-за изменений в структуре сообщества и взаимодействиях сосуществования, таких как выпас скота, хищничество и динамика конкуренции.

Модели разливов нефти используются несколькими способами: для поддержки принятия решений по реагированию, при планировании ликвидации разливов, при анализе воздействия на окружающую среду инфраструктуры нефтяной промышленности, а также при оценке ущерб окружающей среде (и экономике) после разлива.[2]

Цель работы:

Моделирование аварийного разлива нефти как единого образования на акватории Финского залива

Задачи работы:

1. Рассмотреть проблему аварийных разливов нефти на акватории Финского залива
2. Рассмотреть существующие модели
3. Постановка и проведение численного эксперимента с распространением пятна нефти в первые сутки после аварийного разлива в Финском заливе

1. Физико-географическое описание района

1.1 Общая информация

Финский залив является самым восточным заливом Балтийского моря. На западной границе отделен воображаемой линией между мысом Пысаспеа в Эстонии и мысом Ханко в Финляндии.[3] Площадь Финского залива составляет 30 000 квадратных километров. На рисунке 1.1 представлена карта Балтийского моря, включая Финский залив в его восточной части.

Рисунок 1.1 – Балтийское море

Залив неглубокий, в среднем 40 м в глубину, но его дно имеет очень неровный рельеф. В центральной части залива глубина иногда достигает нескольких метров (Савинковская отмель). Максимальная глубина — 121 м — зарегистрирована юго-восточнее острова Кери. Карта глубин представлена на рисунке 1.2.

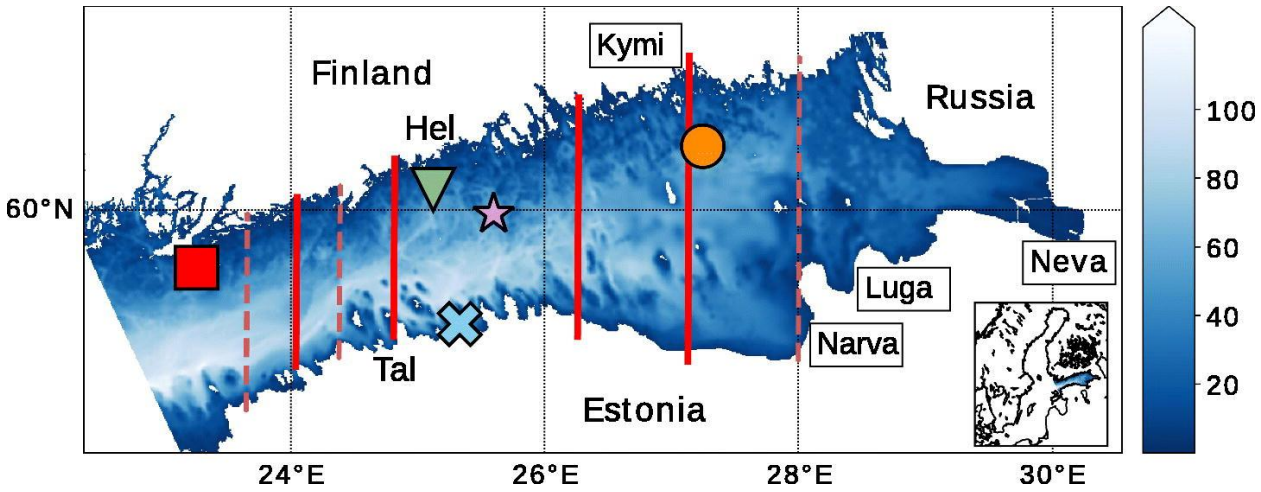


Рисунок 1.2 – Карта глубин Финского залива

Береговая линия северного побережья похожа на фьорд: узкие морские заливы чередуются со скалистыми мысами кристаллического фундамента; есть также много небольших скалистых островов. Южное побережье изрезано палеозойскими осадочными породами. Северо-Эстонский Клинт граничит с впадиной Финского залива с юга. Верхняя часть откоса, обнаженная над уровнем моря, продолжается под морем одной или несколькими террасами на глубину от 100 до 150 м ниже уровня моря

Воды Финского залива являются одними из самых пресных в Балтийском море. Соленость солоноватых вод снижается по мере продвижения с запада на восток с 6‰ до 2 ‰. В восточной части Финского залива до Кронштадта из-за влияния стока Невы вода практически пресная. В районе Сескар и мощный 3-3,5‰, а у Гогланда уже достигает 4-4б5‰. {4]

Поскольку Финский залив является континентальным и имеет довольно низкую соленость, его восточная часть в некоторые зимние месяцы покрыта льдом.

1.2 Циркуляция

Основным воздействующим фактором для течений в Финском заливе является напряжение ветра (основное направление ветра – юго-западное).

Течения, определяемые плотностью, также играют важную роль в общей циркуляции из-за ярко выраженных горизонтальных градиентов, вызванных колебаниями температуры и солености. Наклон поверхности моря, возникающий в результате постоянного поступления воды в восточную часть Финского залива, также вносит заметный вклад в существующую схему циркуляции. Залив достаточно велик, чтобы увидеть влияние вращения Земли на циркуляцию.[5]

Поле остаточной циркуляции - циклоническое (против часовой стрелки в северном полушарии) с течениями, имеющими переменную по горизонтали скорость и устойчивость. Стабильность или постоянство течения определось как отношение между векторной средней скоростью и скалярной средней скоростью. Среднегодовые остаточные векторные скорости составляют порядка 1–2 см/с, а стабильность составляет от 6 до 26 %. Однако стабильность течений в разные сезоны значительно выше, чем в течение всего года (Рисунок 1.3). Относительно плохая стабильность течений в годовом масштабе времени указывает на то, что средняя циркуляция против часовой стрелки является статистическим свойством, а не постоянным явлением. Этот факт часто забывают, и циклоническую циркуляцию рассматривают как постоянный тип циркуляции для Финского задива. Низкая устойчивость течений свидетельствует о важности изменчивости течений, связанной в основном с изменчивостью ветровой нагрузки. Несмотря на то, что из рек в восточной части Финского залива постоянно поступает большое количество пресной воды, средняя векторная скорость на запад почти на порядок меньше, чем средняя скорость у финского побережья. Устойчивость течений вдоль северного берега меньше, чем вдоль южного, а это означает, что хотя может существовать долговременная средняя циркуляция, мгновенные течения могут быть весьма изменчивы как по скорости, так и по направлению. Периодические процессы, подобные инерционным колебаниям и сейшам Финского залива и объединенной системы Финский залив — Собственно Балтика, делают систему течений еще более неоднородной и нестационарной.

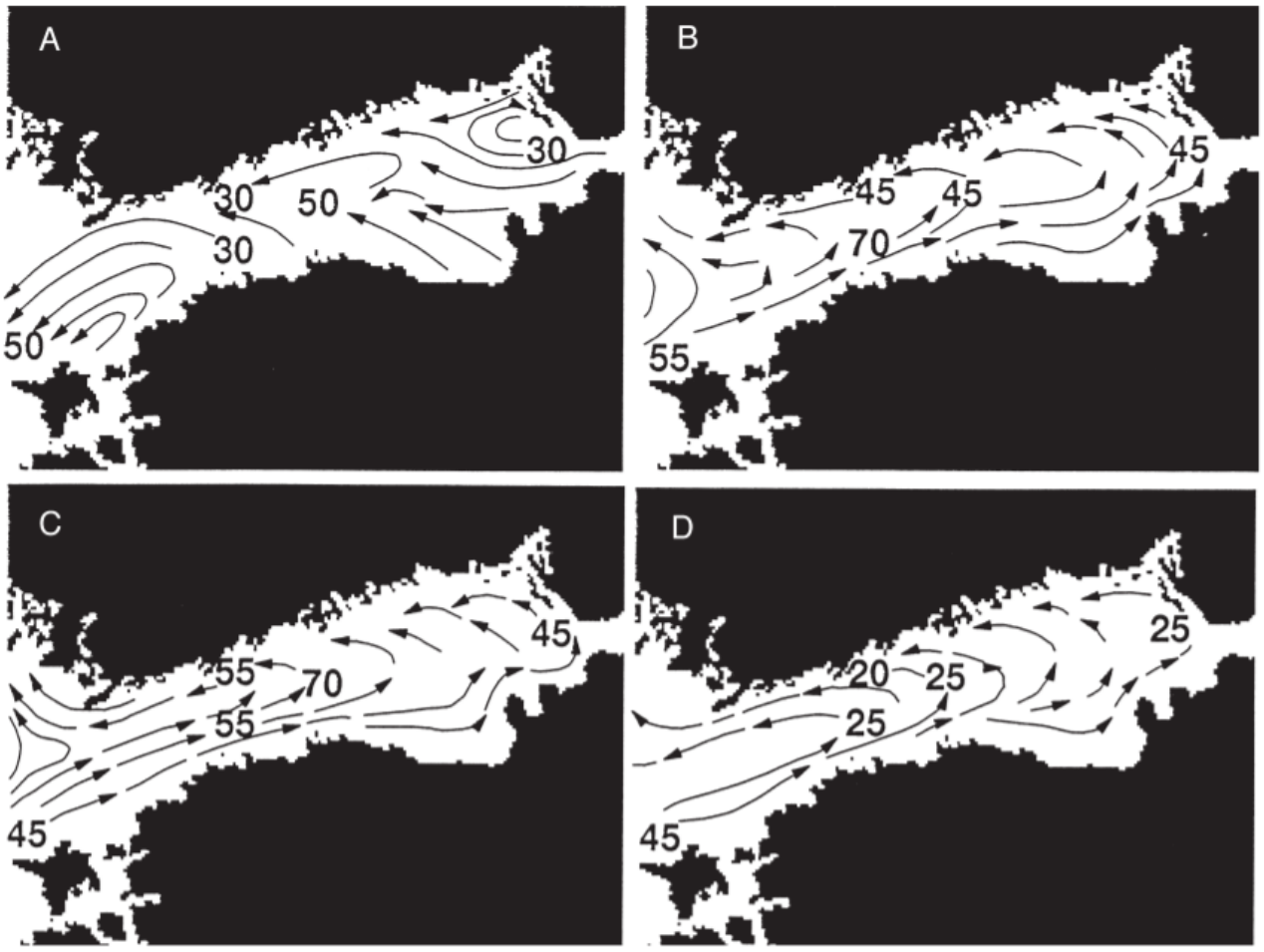


Рисунок 1.3 - Средняя поверхностная циркуляция в Финском заливе. A – июнь, B – август, C – октябрь, D – июнь-октябрь

Главной и общей чертой полей течений в восточной части Финского залива является их неустойчивость, пульсирующие составляющие обычно превышают средние (остаточные) значения.[5]

Относительно плохая стабильность течений в годовом масштабе времени указывает на то, что средняя циркуляция против часовой стрелки является статистическим свойством, а не постоянным явлением.

Устойчивость течений у северного берега меньше, чем у южного, а это означает, что хотя и может существовать средняя многолетняя циркуляция, мгновенные течения могут быть весьма изменчивы как по скорости, так и по направлению.

1.3 Ветер

Балтийское море расположено в пределах западной ветряной зоны, где преобладают циклоны, приходящие с запада или юго-запада. Местные ветра в рассматриваемой области тесно связаны с циклонами и градиентами давления этих ветровых систем. Во время определенных сезонов взаимодействие низкого давления Северной Атлантики (Исландская депрессия) и Сибирского высокого (который охватывает огромную область в северной части Евразии) объясняет распространенность юго-западных ветров.[6]

Согласно многочисленным измерениям ветра на судах [7], преобладают юго-западные ветра в течение почти всего года в открытом Балтийском море. Только в марте-апреле преобладают относительно слабые северные и северо-восточные ветры. Реконструкция морского ветра на основе прибрежных измерения в основном согласуются с этим описанием [8]. Направленное распределение экстремальной скорости ветра также имеет два максимума, соответствующих южному и северному ветрам, а глубокий минимум для восточных ветров и незначительный минимум для северо-западных ветров. В основные свойства распределений направленного ветра (преобладающие ветры, частота их возникновения, распределение среднего и максимального скорости ветра практически идентичны на всей северной Балтике [8].

Анизотропия ветра имеет особое значение для Балтийского моря. Сильно анизотропный местный ветровой климат является одним из основных факторов, формирующих уровень моря и связанными с ним прибрежными процессами [9]. Анализ временного изменения связи между уровнем воды Балтийского моря и Индекс NAO свидетельствует о том, что региональная атмосферная циркуляция иногда отличается от крупномасштабного. Сезонные средние значения местного уровня моря по-видимому, в значительной степени отражают региональный ветровой климат. Уровень Балтийского моря может даже использоваться для идентификации климатических изменений в регионе.[9]

Направленное распределение ветров в собственно Балтийском море имеет два пика, которое особенно эффектно в случае умеренных и сильных ветров и существует во все времена года [8]. Чрезвычайно высокий пик соответствует преобладающим юго-западным ветрам и более низкий пик - к северным или северо-северо-западным ветрам. А глубокий минимум представляет собой низкую частоту восточных ветров (рис. 1.5).

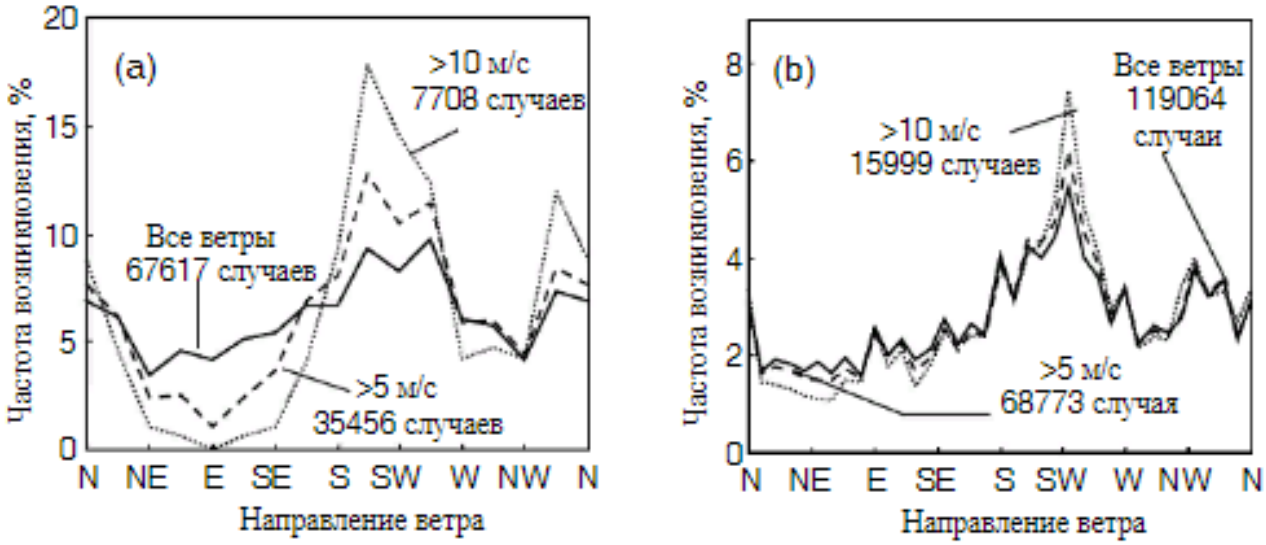


Рисунок 1.5 – Распределение ветров

1.4 Разливы Нефти в Финском заливе

Загрязнение нефтью может быть вызвано любой утечкой сырой нефти или продуктов ее переработки. Одной из главных причин утечки нефти являются выбросы нефти с танкеров и морских буровых платформ, происходящие из-за аварий или преднамеренных выбросов, а также с прорывами скважин или сломанных трубопроводов на суше.

Предсказание местоположения и объема случайного разлива является невозможным, но можно выделить места, где разливы происходят чаще. Так, разливы, связанные с танкерами и другими видами судов, происходят чаще всего на наиболее сильно проходимых морских путях в прибрежных районах.

Эксплуатационные сбросы промывных нефтебаз с танкеров также являются одним из источником, но важность данного источника загрязнения снижается. Этот источник загрязнения связан с тем, что после доставки нефти резервуары заполняются балластом морской воды, а затем происходит выброс трюмной маслянистой воды в море, когда судно движется, чтобы забрать свой следующий груз. Сброс обычно содержит углеводородный остаток, который эквивалентен примерно 0,35% емкости танкера (диапазон от 0,1% для легкой рафинированной нефти до 1,5% для тяжелого бункерного топлива).[10]

Финский залив является одним из наиболее загруженных нефтяными перевозками Балтийского моря. В год по Балтийскому морю перевозится до 180 млн тонн нефти и нефтепродуктов, при этом в день по морю курсирует более 2000 судов

На акватории Финского залива выделяют следующие 3 района, наиболее подверженных загрязнению:[11]

1. Участок акватории Балтийского моря вблизи входа в Финский залив;

В данной зоне главным источником загрязнения являются суда, сбрасывающие воды, содержащие нефтепродукты.

2. Центральная часть Финского залива;

В этой части Финского залива наблюдаются пленочные загрязнения больших площадей, что является характерным для сбросов с неподвижных судов.

3. Невская губа

Наблюдаются крупные разливы вдоль судоходной трассы.

На рисунках 1.6 и 1.7 представлены карты разливов за 2015 и 2019 года. Видно, что хотя общее количество разливов снизилось, места разливов концентрируются вдоль маршрутов судов. Также наблюдаются разливы нефти вдоль береговой линии залива, а именно в тех местах, где расположены порты.

Обращая внимание на количество разливов необходимо отметить, что общее количество уменьшилось, при этом разливов малого объема произошло в 2019 и 2015 одинаково, а количество крупных уменьшилось к 2019 году

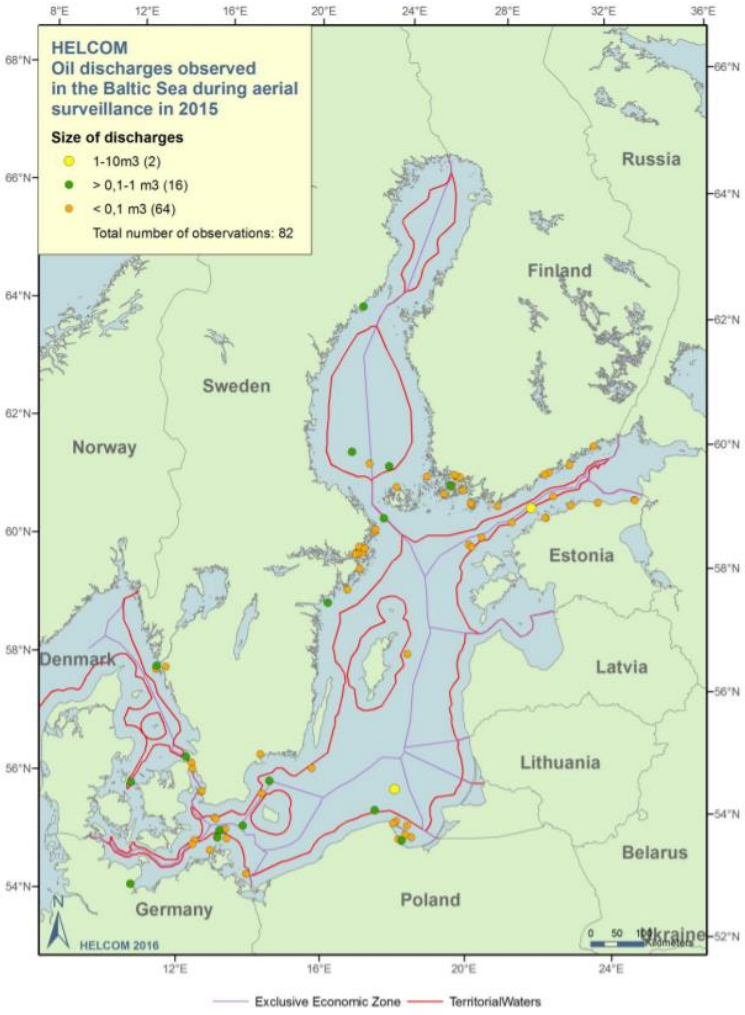


Рисунок 1.6 - Карта разливов за 2015[12]

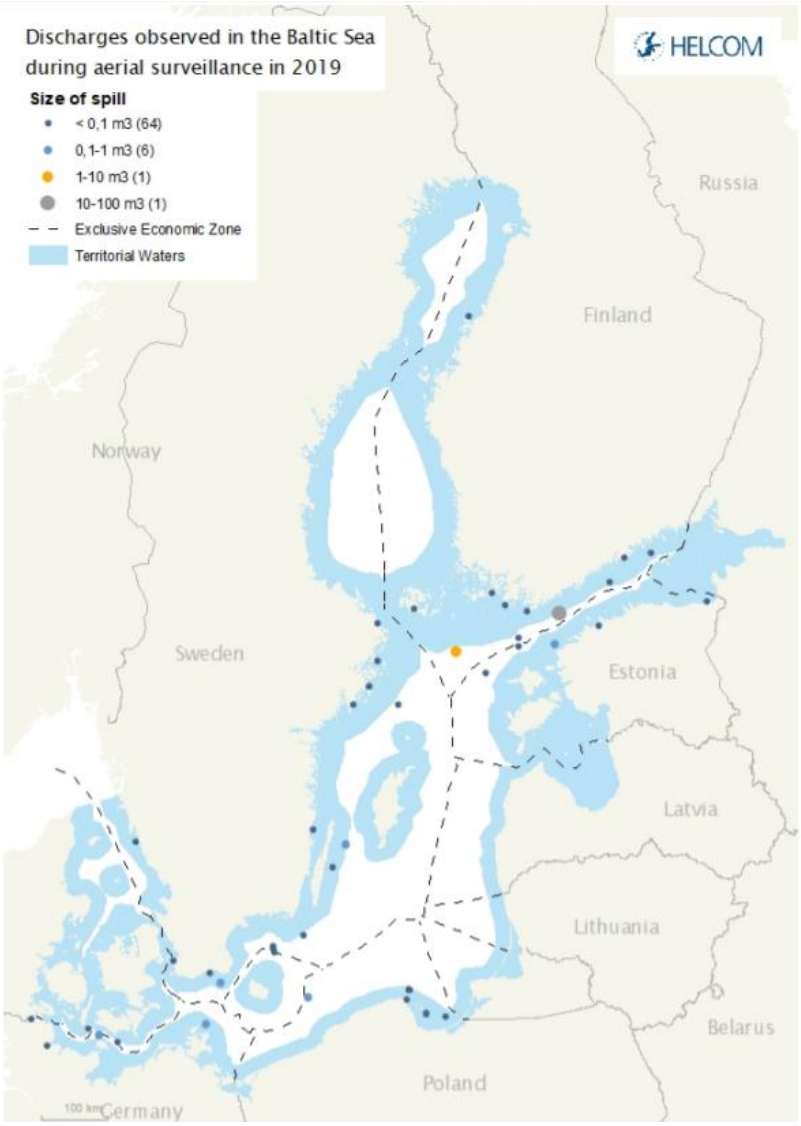
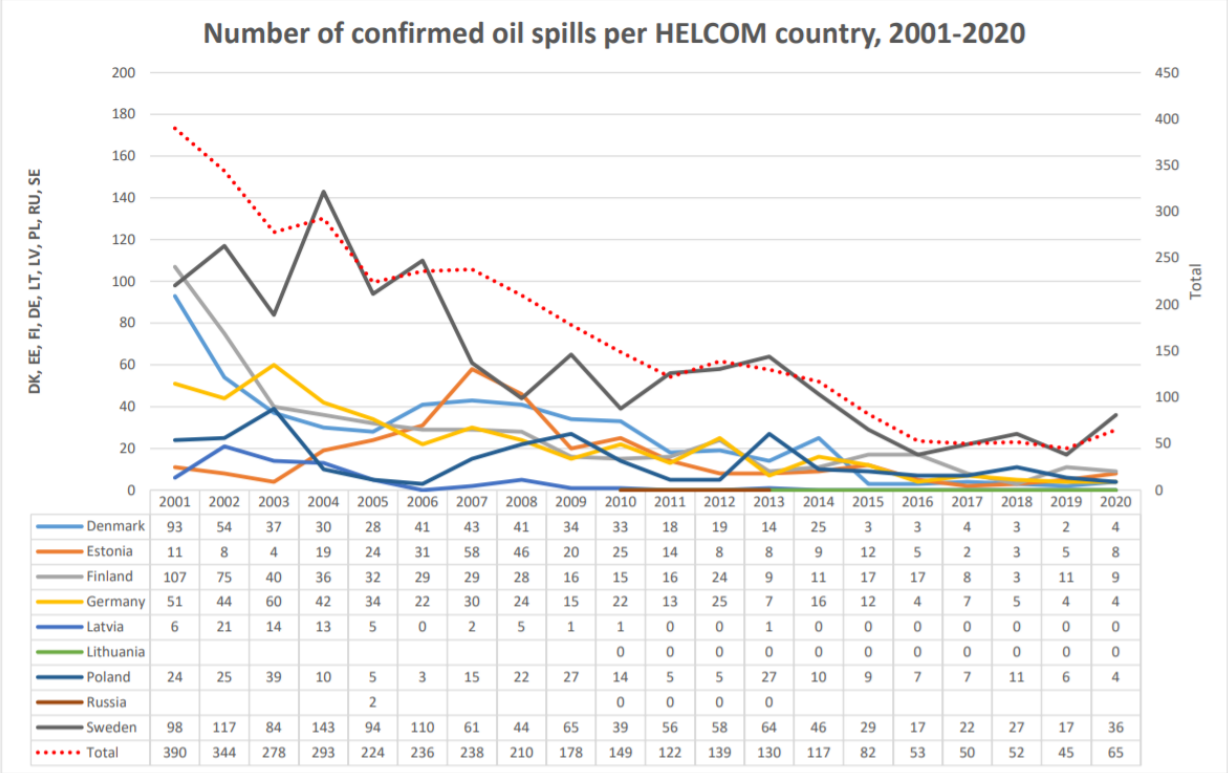


Рисунок 1.7 - Карта разливов за 2019 год[13]

На рисунке 1.8 изображен график изменения количества разливов на акватории Балтийского моря в период с 2001 по 2020 год.



	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Denmark	93	54	37	30	28	41	43	41	34	33	18	19	14	25	3	3	4	3	2	4
Estonia	11	8	4	19	24	31	58	46	20	25	14	8	8	9	12	5	2	3	5	8
Finland	107	75	40	36	32	29	29	28	16	15	16	24	9	11	17	17	8	3	11	9
Germany	51	44	60	42	34	22	30	24	15	22	13	25	7	16	12	4	7	5	4	4
Latvia	6	21	14	13	5	0	2	5	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Lithuania										0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Poland	24	25	39	10	5	3	15	22	27	14	5	5	27	10	9	7	7	11	6	4
Russia					2					0	0	0	0							
Sweden	98	117	84	143	94	110	61	44	65	39	56	58	64	46	29	17	22	27	17	36
Total	390	344	278	293	224	236	238	210	178	149	122	139	130	117	82	53	50	52	45	65

Рисунок 1.8 – График количества разливов на акватории Балтийского моря[13]

Основываясь на графике, можно сделать вывод, что с 2001 года произошло значительное снижение количества разливов. Так, например в 2001 году подтвержденных разливов было 390, а в период с 2015-2019 не количество разливов не превышало 65.

При этом страна ответственная за наибольшее количество разливов на протяжении всего периода являлась Швеция, выбросы нефти остальных стран держались приблизительно на одинаковом уровне.

1.5 Основные порты и судоходство

На акватории Финского залива существует огромное количество портов, из них основными российскими портами являются: Большой порт Санкт-Петербург, Выборг, Приморск, Высоцк.

На рисунке1.9 представлена карта портов Финского залива.

Рисунок 1.9 – Порты Финского залива

Порт Приморск — крупнейший российский нефтеналивной порт на Балтике, конечная точка Балтийской трубопроводной системы.

Высоцк — портовый город в России. В таблице 1.1 представлены значения грузооборота за период с 2010 по 2021 год. Из значений видно, что грузооборот держится в диапазоне 14,8-19,4 млн тонн, при это в период с 2011 по 2019 наблюдался стабильное увеличение оборота, а затем понижение до 16,9 млн тонн в 2021 году.

Таблица 1.1 Грузооборот порта Высоцк в млн тонн [14]

год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
млн. тонн	14,8	13,4	13,6	16,2	17,4	17,5	17,1	17,6	18,8	19,4	18,6	16,9

Морские перевозки в Балтийском море наиболее загружены в Финском заливе.

Залив является важным морским фарватером, в основном из-за транспортировки нефти и грузов в Россию и из России. В среднем количество судов, заходящих и выходящих из залива, ежедневно составляет 105 судов. Из них:

- 55 грузовых судов

- 20 танкеров
- 14 пассажирских судов
- 16 другие типы судов

На рисунке 1.10 представлен график изменения перевозки нефти на акватории Финского залива. Видно, что с 1995 года объем перевозок увеличился в 7 раз.

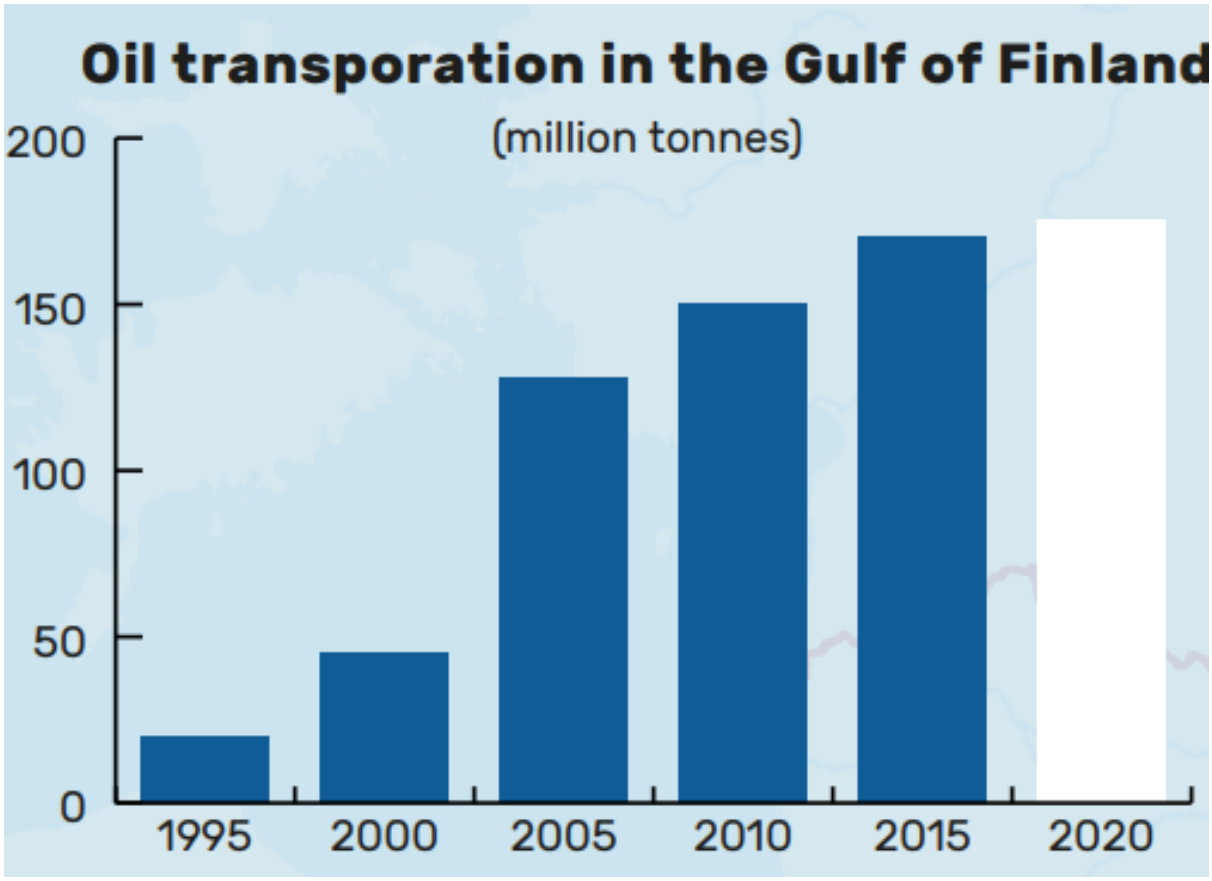


Рисунок 1.10 – Перевозка нефти в тоннах

Техническое развитие систем безопасности на море снизило количество несчастных случаев, несмотря на увеличение интенсивности движения. На рисунке 1.11 представлено ежегодное количество аварий (посадок на мель и столкновений) судов. При этом необходимо отметить, что в 10% случаев авария происходила с танкерами.[15]

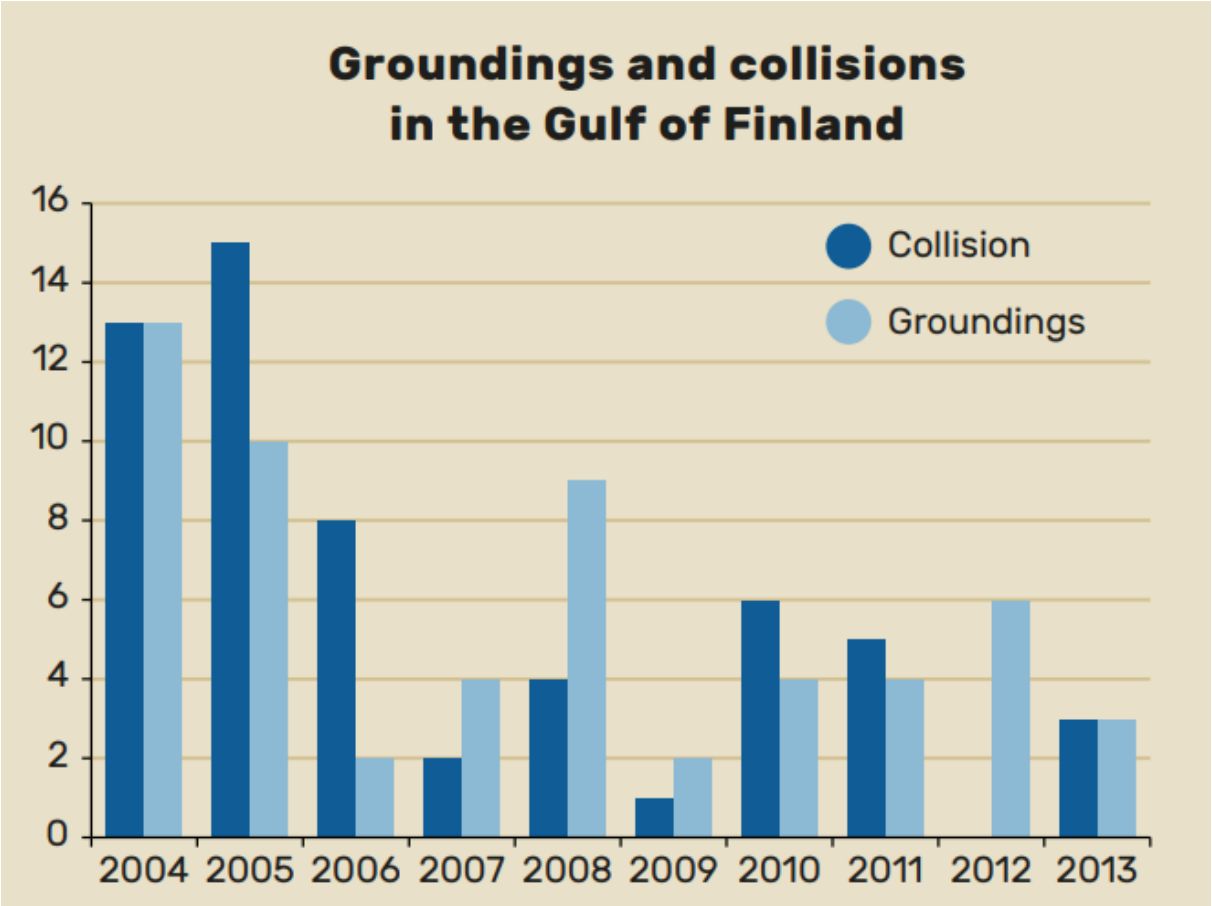


Рисунок 1.11 – Перевозка нефти в тоннах

1.6 Экологические последствия

Экологические последствия разливов нефти можно рассматривать на разных уровнях.

Последствия первого уровня (серые квадраты на рис. 1.12). относятся к самому разливу нефти. Несмотря на то, что каждый разлив уникален, можно выделить ключевые переменны, которые влияют на возникновение разливов нефти и их серьезность (например, объем или физическая степень). Для прогнозирования аварийного разлива наиболее важным предиктором воздействия является его местоположение. Разливы, находящиеся в непосредственной близи к берегу и человеческому населению имеют более серьезные экономические последствия и более дороги для очистки.

Существует множество способов очистки нефтяных загрязнений:

- химические диспергаторы могут быть нанесены на нефть, чтобы разбить нефть на мелкие капли;
- нефть может быть сожжена путем выжигания;
- нефть может быть механически удалена и нефть может быть смыта с береговой линии с помощью шлангов с горячей водой высокого давления, быть снятой с поверхности или поглощенной.

Все способы наносят дополнительный ущерб морским экосистемам и увеличивают время, которое необходимо для восстановления экосистеме.

Последствия второго уровня (зеленые прямоугольники на рис. 1.12) связаны с повреждением экосистем и восстановлением после разлива нефти. Разлив нефти оказывает сильное воздействие на все компоненты морской экосистемы. Химический состав и количество нефти, воздействию которой подвергаются организмы, являются важными факторами, определяющими, как популяции будут реагировать на разлитую нефть.

Время восстановления экосистемы зависит от множества факторов: характеристика разлива, методы и скорость очистки, среда обитания и видов. При достижении от местных гидродинамических условий и субстрата, т.е. от каменистого или песчаного типа берега.

Реакция экосистем на разлив нефти зависит как от прямого воздействия на виды, так и от косвенного воздействия в результате измененных взаимодействий видов.

Последствия третьего уровня - последствие разлива нефти для человеческого общества (оранжевые квадраты на рис. 1.12), включая взаимосвязанные воздействия на здоровье людей, благосостояние сообществ и экономику.[16]

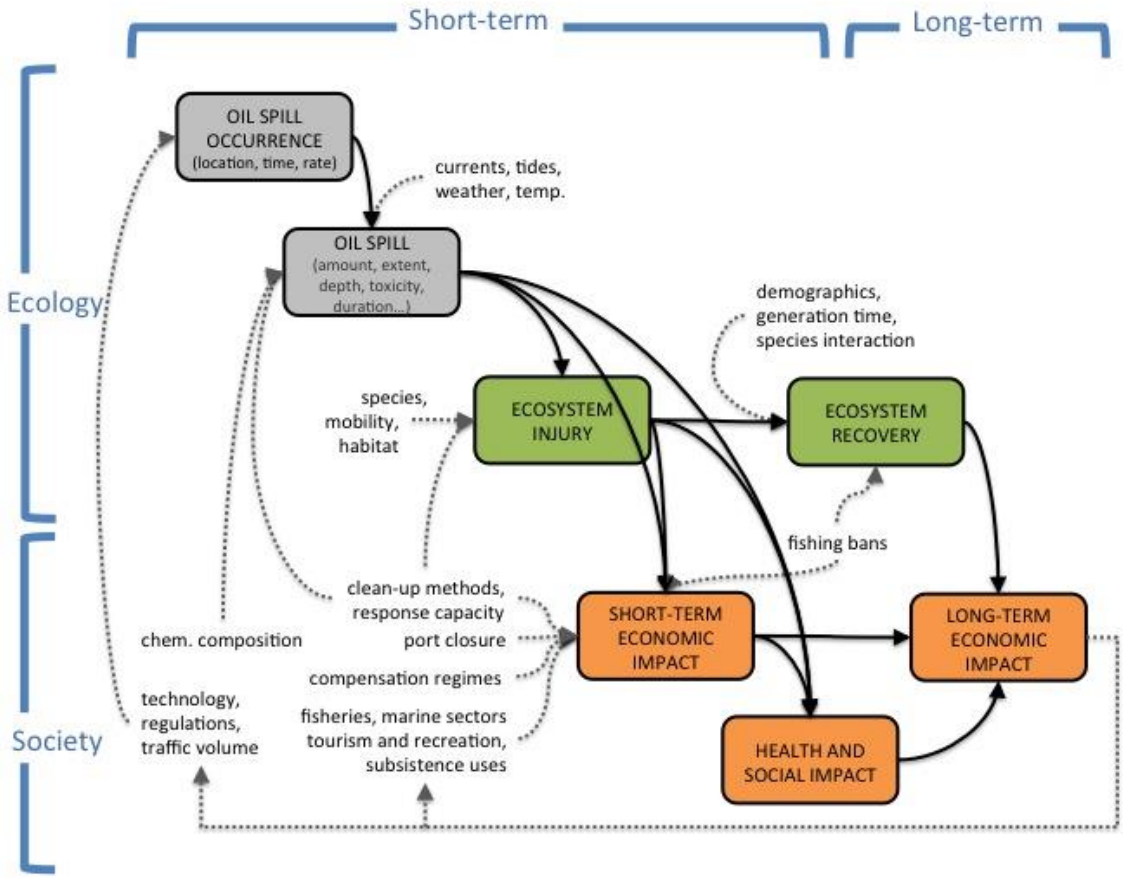


Рисунок 1.12 - Схема воздействия разливов

Важно подчеркнуть, что сам по себе размер разлива не обязательно говорит о его потенциале нанести ущерб. Даже небольшой разлив может нанести ущерб экологически чувствительной среде. Например, недалеко от Норвегии в 1981 году небольшой оперативный сброс маслянистых трюмных смывов с танкера Stylis убил, по оценкам, 30 тысяч морских птиц, потому что нефть повлияла на место, где птицы были сезонно многочисленны.

В другом случае более 16,5 тысяч промасленных магеллановых пингвинов (Spheniscus magellanicus) были выброшены на берег вдоль аргентинского побережья без каких-либо прямых признаков нефтяного пятна. Кроме того, тип нефтепродукта может влиять на тяжесть экологического ущерба. Наиболее важными соображениями в этом отношении являются относительная токсичность и экологическая стойкость разлитых материалов. Начиная с начала 1970-х годов, этот оперативный источник загрязнения

нефтью был существенно уменьшен простым изменением процедуры очистки резервуара, называемой процессом загрузки сверху (LOT). В ЛОТЕ маслянистая промывочная вода удерживается на борту в течение некоторого времени в качестве балласта. Это позволяет большей части нефти отделяться от морской воды. Маслянистый остаток объединяется со следующим грузом, в то время как относительно чистая морская вода сбрасывается. Метод LOT имеет потенциальную эффективность извлечения 99%, но при оперативном использовании она обычно составляет 90% или меньше, в зависимости от того, насколько турбулентным является море во время фазы разделения. В результате широкого (но не всеобщего) внедрения LOT танкерами загрязнение нефтью из этого источника сократилось примерно с 1,1 млн тонн/год в 1973 году до 0,7 млн тонн/год в 1983 году и 0,25 млн тонн в 1989.[10]

При разливе нефти происходит разрушение среды обитания. Одним из последствий является гибель в результате недостатка света под нефтяным пятном планктона, который является, производители в нижней части пищевой цепи. Его гибель оказывает влияние на остальные части пищевой цепи.

Непосредственный контакт с нефтяным загрязнением наносит вред организму. Примером такого воздействия служат птицы, которые при соприкосновении с нефтью теряют способность к полетам и их перья теряют способность отталкивания воды. Также птицы поглощают смертельное количество масла, пытаясь очистить свои перья. Другим примером является воздействие нефти на млекопитающих, чей мех служит тепловым изолятором. Когда нефть насыщает мех, она разрушает способность меха сохранять тепло. Морские млекопитающие получить смертельную дозу нефти, пытаясь очистить свой мех.

На территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области насчитывается 19 особо охраняемых природных зон, охватывающих прибрежные территории Финского залива и Ладожского озера. В частности, в открытой части Финского залива – 9 ООПТ, в Невской губе–8 ООПТ,в Ладожском озере-2 ООПТ.

Финский залив подвергается большому антропогенному прессу в связи с присутствием на нем большого количества морских торговых портов с высокой транспортной нагрузкой

Мелководья Финского залива и Ладожского озера являются важнейшими местообитаниями для нерестящихся рыб, гнездящихся птиц, а также местами миграционных стоянок птиц водно-болотного комплекса.

Здесь располагаются места массовых миграционных стоянок в весенний и осенне-летний период. Многие виды здесь гнездятся, часто образуя колонии.

В настоящее время природно-заповедный фонд Санкт-Петербурга включает 16 заповедных территорий: 9 государственных природных заказников и 7 памятников природы, которые в общей сложности занимают 4,5 % от площади Санкт-Петербурга (6 473,7 га). В системе ООПТ города представлены все основные типичные, редкие и ценные природные комплексы Приневской низменности: крупные болотные массивы, таёжные, смешанные и широколиственные леса, морские побережья, мелководья Невской губы – места миграционных стоянок птиц на Беломоро-Балтийском пролётном пути, островные, речные и озёрные системы, геологические обнажения, возвышенности, старинные пейзажные парки.

На рисунке 1.13 выделены ООПТ северного побережья Финского залива. Как видно из карты, на которой красном обозначены существующие ООПТ, охраняемая территории находятся не далеко от входа в порт Приморск, который является крупнейшим нефтяным российским портом на территории Финского залива. Следовательно, для данной зоны нужно точное определения траектории пятна, для того чтобы устранить его распространение до нанесения непоправимых последствий на местную экосистему.

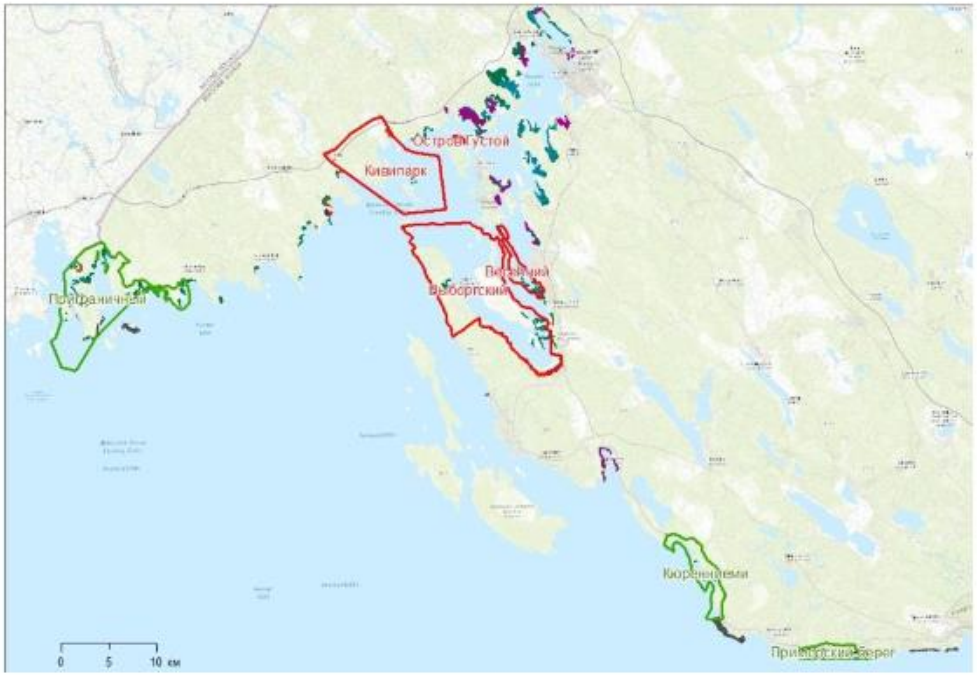


Рисунок 1.13 – ООПТ Северного побережья Финского залива

На рисунке 1.14 существует аналогичная ситуация. Наличие ООПТ недалеко от порта, и, следовательно, с большой опасностью аварийного разлива нефти.

Рисунок 1.14 – ООПТ Южного побережья Финского залива

2. Современные подходы к моделированию

2.1. Модель GNOME

GNOME — это общедоступная модель траектории разлива нефти, которая имитирует движение нефти. из-за ветров, течений, приливов и отливов. GNOME был разработан отделом реагирования на опасные материалы (HAZMAT) Национального океанического и атмосферного административного отдела реагирования и восстановления.

При помощи модели можно:

- Прогнозировать, как ветер, течения и другие процессы могут перемещать и распространять нефть
- Узнать, как на прогнозируемые траектории движения нефти влияет неточность («неопределенность») наблюдений и прогнозов течений и ветра.
- Посмотреть, как прогнозируется химическое и физическое изменение разлитой нефти в течение того времени, пока он находится на поверхности воды.[17]

Движущие силы — это любые физические явления, вызывающие движение загрязняющих веществ (а именно нефти) в воде — обычно это течения, ветры и диффузия. Силы делятся на две категории. Универсальные - применяются везде, и обычно состоят из ветра и диффузии. Все остальные - применяются только к той карте, к которой они привязаны.

Чтобы получить общее движение компоненты скорости u (восток-запад) и v (север-юг) от течений, ветра, диффузии и любых других движущий сил складываются вместе на каждом временном шаге, i, с использованием прямой схемы Эйлера (также известной как 1-й -порядковый метод Рунге-Кутты). Частицам дается точка (x, y, z, t), и они возвращают перемещение (Δx, Δy, Δz) за t (2.1).

$$\Delta x = \frac{\frac{u}{111{,}120.00024}\Delta t}{\cos(y)} \quad (2.1)$$

$$\Delta y = \frac{v}{111{,}120.00024}\Delta t$$

$$\Delta z = 0$$

Где Δt = t - t1 – время, прошедшее между временными шагами i;

y — широта в радианах;

111 120,00024 — количество метров на градус широты

а также (Δx, Δy) — двумерное смещение по долготе и широте, соответственно, на заданном глубинном слое z.

В настоящее время движение в GNOME не может происходить между слоями глубины (таким образом, вертикальное смещение Δz удерживается на нуле); эта функция находится в разработке.

Расчет общего перемещения представляет собой простое векторное сложение перемещений заданного загрязняющего вещества.

Для течений в составе GNOME существует отдельная гидродинамическая модель – Анализ течений для моделирования траекторий (Current Analysis for Trajectory Simulation/ CAT). Модель CATS представляет собой двумерную усредненную по глубине стационарную конечно-элементную модель циркуляции. CATS генерирует постоянные шаблоны, которые в GNOME становятся зависимыми от времени, связывая их с временными рядами, такими как коэффициенты приливов и отливов. Эти шаблоны довольно быстро генерируются и легко настраиваются.

Используется пространственный паттерн из CATS, $\vec{U}_{CATS}$, для течений, а затем временные ряды приливных течений NOAA для ближайшей

приливной станции для регулировки значений течений вперед. Так, для станции в точке (x0,y0), течения и в любой точке определяются уравнением 2

$$\vec{U}(x,y) = \vec{T}(x_0, y_0, t)\frac{\vec{U}_{CATS}(x,y)}{\overrightarrow{U_{cCATS}}(x_0,y_0)} \quad (2.2)$$

Случайное распространение, то есть диффузия, осуществляется простым случайным блужданием с вероятностью, равной квадрату единицы. Случайное блуждание основано на значении диффузии D, установленном в модели, которая представляет горизонтальную вихревую диффузию в воде.

В GNOME диффузия и распространение рассматриваются как стохастические процессы. Эффекты гравитации и поверхностного натяжения игнорируются, поскольку они важны только в первые моменты разлива. Сложные представления эффектов диффузии и расширения подсетки игнорируются. GNOME использует классическую диффузию, как указано в уравнении 3 и уравнении 4.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla^2 C \quad (2.3)$$

где C — концентрация вещества, а D — упомянутый выше коэффициент диффузии.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (2.4)$$

где Dx и Dy — скалярные коэффициенты диффузии в направлениях x и y.

Ветер также оказывает влияние на нефть. Обычно это около 3% скорости ветра, что основано на аналитических выводах и эмпирических наблюдениях, что нефть имеет тенденцию распространяться в направлении ветра.

Парусность является свойством частицы в разливе и, таким образом, применяется к любому воздействию ветра, который настраивает пользователь.

GNOME выбирает случайное число в выбранном пользователем диапазоне значений ветра для каждой частицы и перемещает ее в соответствии с этим числом на каждом временном шаге. Этот метод очень похож на метод, используемый для расчета диффузии, за исключением того, что распространение происходит только в направлении ветра. Величина определяется уравнением:

$$\frac{d\sigma^2}{dt} = S(t) \qquad (2.5)$$

Взаимодействие с берегом

На каждом временном шаге после перемещения частиц GNOME проверяет карту (т. е. как растровое изображение), чтобы посмотреть, находятся ли новые позиции частиц на суше или в воде. Алгоритм проверяет всю строку на растровом изображении между старой точкой и новой точкой, чтобы убедиться, что частица не перепрыгнула через землю, и прикрепляет частицу на первом поле земли, в которое она попадает. Местоположение в воде непосредственно перед достижением земли также сохраняется, чтобы использовать его в качестве отправной точки, когда частица снова всплывает. Если флажок «предотвратить прыжок по земле» не установлен, упрощенный алгоритм проверяет, находится ли новая точка в воде или на суше, и игнорирует путь, по которому прошла частица. По умолчанию включена опция предотвращения прыжков с земли. Взаимодействие загрязнителя с отложениями и биотой не моделируется.

Течения

Неопределенность картины течений представляет собой комбинацию двух типов неопределенности: неопределенности течений и неопределенности от перемешивания вихрей. Неопределенность течений параметризуется четырьмя шкалами, которые представляют собой процент от заданной скорости, который охватывает неопределенность в параллельном и

нормальном направлениях: α и α в прямом и обратном направлениях, а β и β в левом и правом направлениях, соответственно. Эти коэффициенты выражаются в процентах от заданной скорости $\|\vec{V}\|$. Масштаб вихрей γ определяется по уравнению 2.6 с использованием отдельного коэффициента диффузии неопределенности D, обычно O≤(10^6 $см^2$/с)

$$\gamma_D = \frac{a_{U_n} V_0}{V_0 + \|\vec{V}\|} \qquad (2.6)$$

где $\|\vec{V}\|$ — модуль исходного вектора скорости течения;

V — малый масштаб скорости (0,1 м/с);

$a_{U_n} = \sqrt{6 D_{u_n} \delta t}$ — длина случайного блуждания для коэффициента диффузии неопределенности [18]

2.2 MEDSLIK-II

Модель MEDSLIK-II позволяет проследить перенос поверхностного пятна, под действием ветра и течений. Помимо адвективных и диффузионных перемещений, частицы нефтяного разлива изменяются вследствие различных физико-химических процессов, преобразующих нефть. MEDSLIK-II включает в себя правильное представление высокочастотных токов и ветровых полей в адвективных компонентах модели лагранжевой траектории, введение скорости дрейфа Стокса и связь с данными дистанционного зондирования.[19]

MEDSLIK-II включает инновационную обработку течений поверхностной скорости, используемую в лагранжевых уравнениях адвекции-диффузии.

Модель связана с оперативными океанографическими течениями, атмосферными анализами ветров и данными дистанционного зондирования для инициализации. Анализируется чувствительность моделирования

разливов нефти к нескольким параметрам модели, и результаты подтверждаются с использованием поверхностных дрифтеров, SAR (радар с синтезированной апертурой) и оптических спутниковых изображений в различных регионах Средиземного моря.[20]

Движение нефти в морской среде обычно связывают с адвекцией крупномасштабным полем течения с рассеиванием, вызванным турбулентными составляющими потока. В то время как нефть движется, ее концентрация изменяется из-за нескольких физических и химических процессов, известных как процессы выветривания. Общее уравнение для концентрации трассера C(x, y, z, t) в единицах массы по отношению к объему, смешанного в морской среде, выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U\nabla C = \nabla \cdot (K\nabla C) + \sum_{j=1}^{M} r_j(x, C(x,t), t) \qquad (2.7)$$

Где

∂/∂t — локальный оператор скорости изменения времени,

U — среднее поле морского течения с компонентами (U,V ,W);

K — тензор диффузии, который параметризует турбулентные эффекты,

rj (C) — скорости преобразования M, которые изменяют концентрацию трассера посредством физических и химических процессов преобразования. Решение уравнения численно в эйлеровой системе хорошо известная проблема в океанографии, метеорологии, химии атмосферы и в моделировании экосистем.[21]

Эволюция концентрации нефти в рамках лагранжевого формализма основана на некоторых фундаментальных предположениях. Одним из наиболее важных из них является соображение о том, что составляющие частицы не влияют на гидродинамику и процессы воды. Это предположение имеет ограничения на поверхности океана, поскольку плавающая нефть локально изменяет взаимодействие воздуха и моря и сопротивление ветра у

поверхности. Кроме того, составляющие частицы движутся через бесконечно малые смещения без инерции (как водяные частицы) и не взаимодействуя между собой. После таких бесконечно малых смещений объем, связанный с каждой частицей, изменяется из-за физических и химических процессов, действующих на все пятно, а не на свойства отдельных частиц. Это фундаментальное допущение, которое отличает лагранжевы модели нефтяных пятен от морских биохимических трассерных лагранжевых моделей, в которых отдельные частицы претерпевают биохимические превращения.

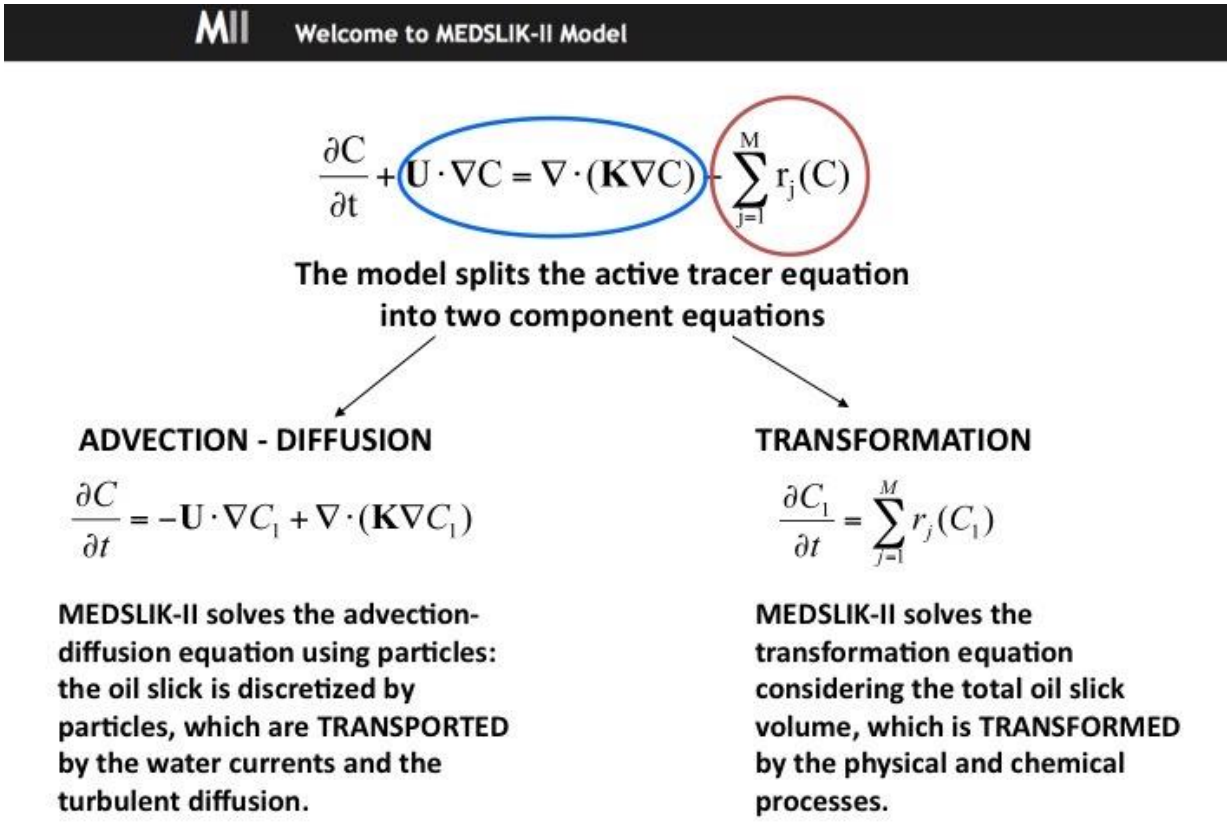


Рисунок 2.1 - Концептуальная основа MEDSLIK-II

2.3 MOHID Water

«Гидродинамический» модуль системы MOHID способен моделировать течение в водных массах, где скорость течения ниже скорости волны давления.

С помощью этого модуля моделировались гидродинамические процессы в океанах (Атлантический СВ и Атлантический ЮЗ), в прибрежных районах (несколько районов вдоль побережья Португалии и Бразилии), в более чем 30 эстуариях и лагунах (европейских, африканских и бразильских эстуариях и лагунах). и в плотинах (юг Португалии).

Все эти изучаемые районы имеют сложные течения и интенсивную экологическую деятельность, тесно связанную с гидродинамическими процессами. Модуль «Гидродинамика» призван стать числовым инструментом, ориентированным на понимание биогеохимических процессов и решение экологических проблем, связанных с деятельностью человека.

Приближения

- приближение Буссинеска.
- Гидростатический поток

На рисунке 2.2 представлена схема модели, на которой представлены рассматриваемые моделью процессы.[22]

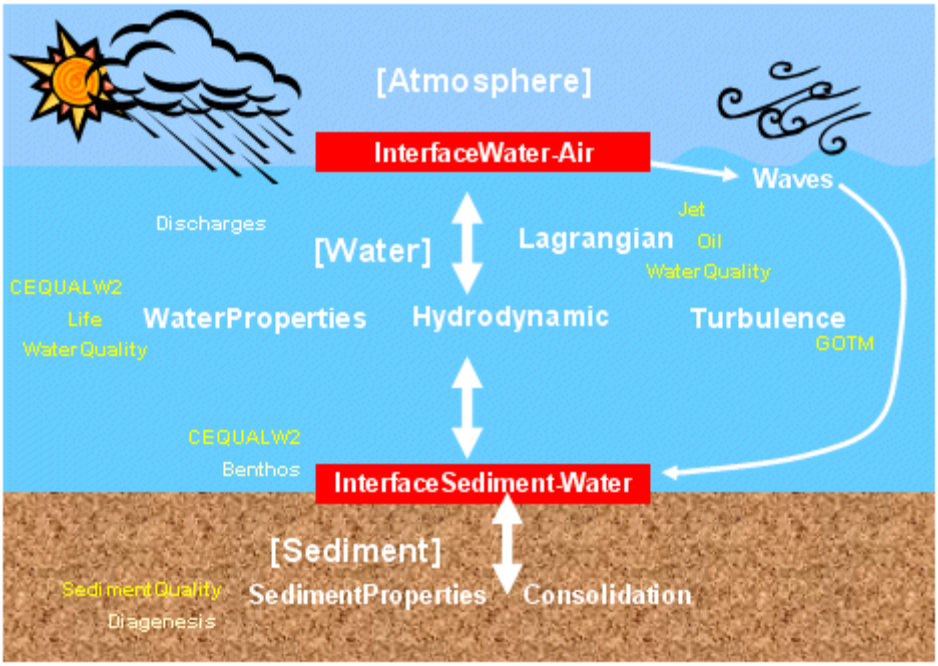


Рисунок 2.2 – Схема для MOHID Water

Лагранжев модуль MOHID использует концепцию трассировщика. Наиболее важным свойством трассировщика является его позиция (x, y, z). Для физика трассером может быть масса воды, для геолога — частица осадка или группа частиц осадка, а для химика — молекула или группа молекул.

Биолог может обнаружить клетки фитопланктона в трассере (в нижней части пищевой цепи) так же, как и в акуле (в верхней части пищевой цепи), а значит, такая модель может моделировать широкий спектр процессов.

На движение трассеров может влиять поле скоростей из гидродинамического модуля, ветер из наземного модуля, скорость распространения из модуля диспергирования нефти и случайная скорость.

На данном этапе модель способна моделировать диспергирование нефти, изменение качества воды и перенос наносов.

Для имитации диспергирования нефти лагранжев модуль взаимодействует с модулем диспергирования нефти, для моделирования эволюции качества воды лагранжев модуль использует функцию модуля качества воды. Перенос наносов можно напрямую связать с трассерами, используя понятие скорости оседания.

Еще одной особенностью лагранжевой транспортной модели является возможность расчета времени пребывания. Это может оказаться очень полезным при изучении обмена водных масс в заливах или эстуариях.

3 Формулировка модели

3.1 Рассмотрение пятна как единого образования

Существующие математические модели, отражающие основные происходящие с нефтью физико-химические процессы, эффективно воспроизводят движение, распространение и эволюцию разлившихся нефтепродуктов, что помогает планировать меры реагирования.

Задачей численного моделирования является проведение численных экспериментов по поведению любого вещества на поверхности моря, которое не может быть описано как набор независимых частиц. В этом случае каждая частица примесного пятна не может пройти через турбулентную диффузию независимо, потому что межчастичные силы намного больше, чем диффузионные силы. Поэтому для моделирования движения пятна сырой примеси на поверхности моря необходимо использовать другой метод расчета движения.[25]

Вязкость нефти оказывает большое влияние на растекание пятна и его дрейф. Обычно маловязкий тип растекается намного быстрее, чем высоковязкие. Кроме того, высоковязкие нефти более устойчивы к деформации при растекании и дрейфе. Вязкость будет очень высокой в условиях низких температур.

Так как вязкость нефти намного больше вязкости воды, то является невозможным перемещение отдельных молекул нефти отдельно от пятна. Таким образом, метод расчета распространения аварийного разлива нефти с помощью уравнения турбулентной диффузии скалярных величин в эйлеровой постановке и метод распространения диффундирующих частиц в лагранжевых координатах не являются подходящими.

В настоящее время нет теории исчисления вариаций сил межмолекулярных взаимодействий в жидком веществе посредством действия

сильных трений другой жидкости. Поэтому необходимо рассчитывать движение пятна сырой нефти как единого образования

3.2 Криволинейная сетка

Для проведения численного эксперимента была составлена криволинейная координатная сетка. Т.к. эллиптические системы дифференциальных уравнений позволяют задавать значения на границах и имеют принцип максимума, то координаты в области были определены как системное решение эллиптических дифференциальных уравнений с граничными условиями Дирихле.

Для вычисления координат x(ζ, η) и y(ζ, η) производится решения двух эллиптических уравнений Лапласа (3.1)

$$\zeta_{xx} + \zeta_{yy} = 0 \quad \text{и} \quad \eta_{xx} + \eta_{yy} = 0 \tag{3.1}$$

После чего производится переход к новым переменным в (3.2), получаем

$$g_{22}x_{\zeta\zeta} - 2g_{12}x_{\zeta\eta} + g_{11}x_{\eta\eta} = 0 \quad , \tag{3.2}$$

$$g_{22}y_{\zeta\zeta} - 2g_{12}y_{\zeta\eta} + g_{11}y_{\eta\eta} = 0 \quad , \tag{3.3}$$

где x (ζ, η) и y (ζ, η) вдоль координатных границ ζ = const и η= const.

Значение координат x(ζ, η) и y(ζ, η) рассчитывается только в точках узлов сетки, т.к. используются конечно-дифференцированные методы решения уравнений гидродинамики и переноса примеси. [23]

$$x^{n+1} = \omega\left(g_{22}\delta_\zeta x^n - \frac{1}{2}g_{12}\delta_{\zeta\eta}x^n + g_{11}\delta_\eta x^n\right)/[2(g_{22}+g_{11})] - (\omega - 1)x^n, \quad (3.4)$$

$$y^{n+1} = \omega\left(g_{22}\delta_\zeta y^n - \frac{1}{2}g_{12}\delta_{\zeta\eta}y^n + g_{11}\delta_\eta y^n\right)/[2(g_{22}+g_{11})] - (\omega - 1)y^n, \quad (3.5)$$

На рисунке 3.1 показана полученная криволинейная сетка для Финского залива.

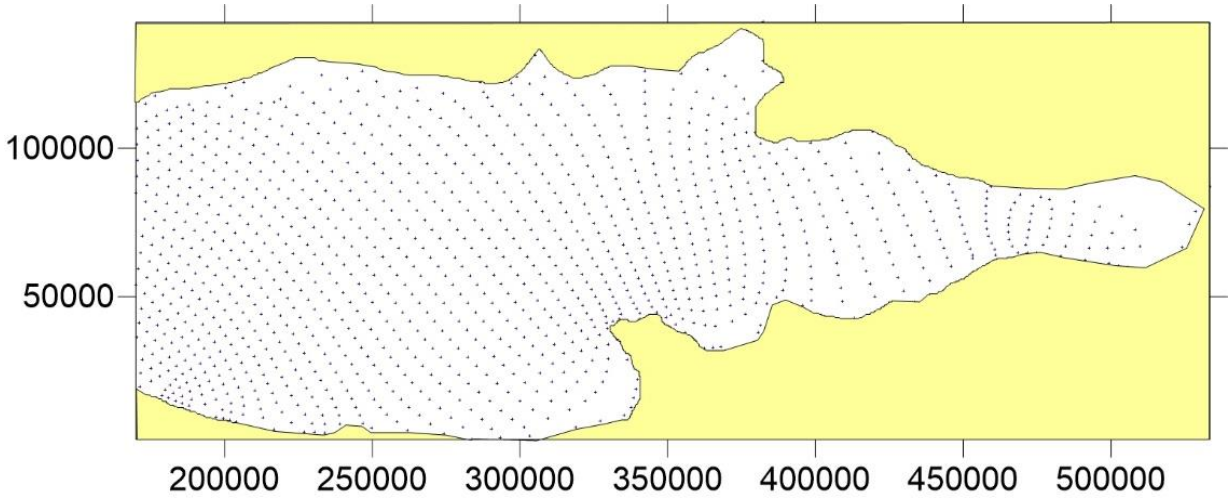


Рисунок 3.1 – Неортогональная криволинейная сетка модели

3.3 Уравнение мелкой воды для криволинейной сетки

Уравнения мелкой воды представляют собой упрощенную модель полных уравнений Навье–Стокса.Вертикальной составляющей скорости в слое можно пренебречь и полагать, что продольные скорости постоянны по толщине слоя, т.к. среда представляет собой тонкий слой.[24]

Решение уравнений мелкой воды возможно при использовании уравнения с контрвариантными потоками.

Уравнение мелкой воды в криволинейных координатах будет выглядеть следующим образом:

$$p_t + \gamma\xi_\zeta - \beta\xi_\eta = \psi_1, \quad (3.6)$$

$$q_t + \alpha\xi_\eta - \beta\xi_\zeta = \psi_2, \quad (3.7)$$

$$\xi_t + J^{-1}(p_\zeta + q_\eta) = \omega_z, \quad (3.8)$$

Где $\alpha = gHJ^{-1}({x_\zeta}^2 + {y_\zeta}^2)$

$\gamma = gHJ^{-1}({x_\eta}^2 + {y_\eta}^2)$,

$\beta = gHJ^{-1}(x_\zeta y_\eta + y_\zeta y_\eta)$,

$\psi_1 = J^{-1}(\varphi_1 y_\eta - \varphi_2 x_\eta)$,

$\psi_2 = J^{-1}(\varphi_2 x_\zeta - \varphi_1 y_\zeta)$.

$p = H(uy_\eta - vx_\eta)$, - контрвариантный поток

$q = H(vx_\zeta - uy_\zeta)$, - контрвариантный поток

Систему уравнений (3.6) - (3.8) можно записать следующим образом:[23]

$$W_t + AW_\zeta + BW_\eta = \psi;$$

$$W = \begin{pmatrix} p \\ q \\ H \end{pmatrix}; A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \gamma \\ 0 & 0 & -\beta \\ J^{-1} & 0 & 0 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\beta \\ 0 & 0 & \alpha \\ 0 & J^{-1} & 0 \end{pmatrix}; \psi = \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \omega_z \end{pmatrix}, \quad (3.9)$$

3.4 Адвективно-диффузная составляющая

Одна из трудностей при решении уравнения адвекции-диффузии заключается в том, что необходимо правильно корректировать компоненты адвекции. Исходя из этого, уравнение должно удовлетворять общим требованиям, а подходящая схема решения должна быть достаточно точной и иметь необходимые требования к дисперсии и диффузии.

Используя контрвариантные потоки p и q, можно выразить адвективные компоненты в криволинейных координатах, используя закон сохранения масс:

$$(ucH)_x + (vcH)_y = J^{-1}[(pc)_\zeta + (qc)_\eta], \tag{3.10}$$

Формулы для диффузионных компонентов выглядят следующим образом:

$$\mu_c \nabla^2(cH) = \mu_c[(g_{22}HJ^{-1}c_\zeta)_\zeta + (g_{11}HJ^{-1}c_\eta)_\eta - -(g_{12}HJ^{-1}c_\eta)_\zeta - (g_{12}HJ^{-1}c_\zeta)_\eta], \tag{3.11}$$

Данная формула достаточно консервативна, и ее сложно использовать, поскольку она имеет производные Якоби и метрические коэффициенты. Для эллиптической сетки формула примет следующий вид.

$$\mu_c \nabla^2(cH) = \mu_c HJ^{-1}\left(g_{22}c_{\zeta\zeta} + g_{11}c_{\eta\eta} - 2g_{12}c_{\zeta\eta}\right) \tag{3.12}$$

Тогда для криволинейных координат уравнение можно записать следующим образом:[14]

$$J(Hc)_t + (pc)_\zeta + (qc)_\eta =$$

$$= \frac{\mu_c H}{J}\left(g_{22}c_{\zeta\zeta} + g_{11}c_{\eta\eta} - 2g_{12}c_{\zeta\eta}\right) - \lambda JHc + w_* c_*, \qquad (3.13)$$

3.5 Течения и ветер

Основной вклад в перенос нефтяного загрязнения вносят поверхностные течения и ветер, но взаимодействие между нефтью, ветром и течением изучено не до конца. Теоретически, можно описать механизм функции взаимодействия нефти и воды, а также нефти и атмосферы.

Действие ветра и течений можно описать с помощью восходящих и нисходящих импульсных потоков. Эти потоки являются напряжениями ветра и течения:

$$\tau_a = \rho_a C_{d\,a}(U_a - U_c)\cdot\left|U_a - U_c\right|, \qquad (3.14)$$

$$\tau_w = \rho_w C_{d\,w}(U_w - U_c)\cdot\left|U_w - U_c\right|, \qquad (3.15)$$

Для малых масштабов времени при определении граничных условий на поверхности уравнения движения можно записать в стационарном режиме как:

$$-fV_c = -\frac{1}{\rho_c}\frac{\partial \tau_x}{\partial z}, \qquad (3.16)$$

$$fU_c = -\frac{1}{\rho_c}\frac{\partial \tau_y}{\partial z}, \qquad (3.17)$$

Скорость нефтяного пятна является постоянной в пределах толщины пятна. Следовательно, уравнения (3.21) и (3.22) могут быть интегрированы по толщине сырой нефти.

$$-fV_c h_c = \frac{1}{\rho_c}(\tau_a^x - \tau_w^x), \tag{3.18}$$

$$fU_c h_c = \frac{1}{\rho_c}(\tau_a^y - \tau_w^y), \tag{3.19}$$

Уравнения передачи импульса в нефтяном пятне.

$$U_c = C_{tr_a} U_a + C_{tr_w} U_w, \tag{3.20}$$

$$V_c = C_{tr_a} V_a + C_{tr_w} V_w, \tag{3.21}$$

Однако сырая нефть является жидкой и не может транспортироваться как твердое тело без изменения своей формы. В первом приближении рассчитываетя перенос границы нефтяного пятна. Вычисляются положения каждой из всех точек в области пятна. Это позволяет определить положение любого пятна и наблюдать за изменением его формы.[25]

4 Численный эксперимент

4.1 Исходные данные

Для проведения численного эксперимента были получены и обработаны данные с CMEMS NEMO surface model fields, полученные с marine.copernicus.eu, по значениям течения и ветра.

Полученные данные были интерполированы на криволинейную сетку Финского залива для дальнейших расчетов, а также загружены в GNOME.

4.2 Первый эксперимент

В качестве первого эксперимента было решено провести два расчета траектории движения пятна в Нарвском заливе недалеко от береговой линии. Время распространения пятна – 24 часа, начальные координаты – 59.45 с.ш. и 27.57 в.д.

Первый расчет проводился при помощи модели GNOME и, соответственно, был использован метод Лагранжа. В результате была получена следующая траектория нефтяного загрязнения.

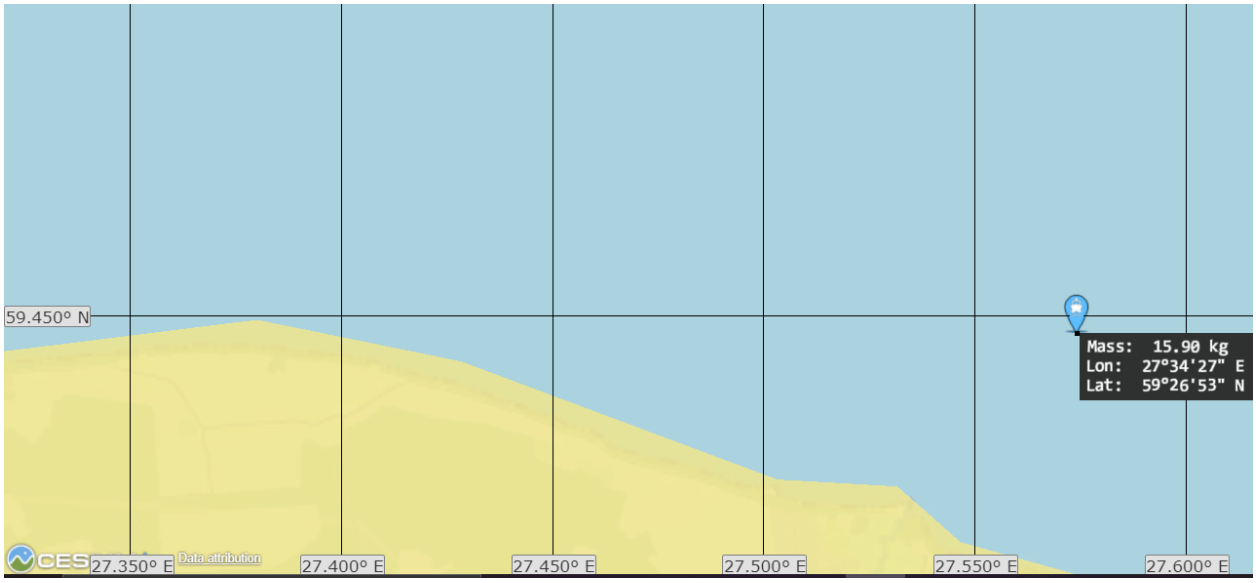


Рисунок 4.1 – Расчет в GNOME. Начальный момент времени

Как видно из полученной картинки в начальный момент времени пятно нефти сконцентрировано в одной точке. Пятно представлено как 1000 отдельных частиц, каждой из которых предписан свой объем и координаты. Отклонения от ветра и течений осуществляется путем горизонтальной диффузии, которая задается пользователем.

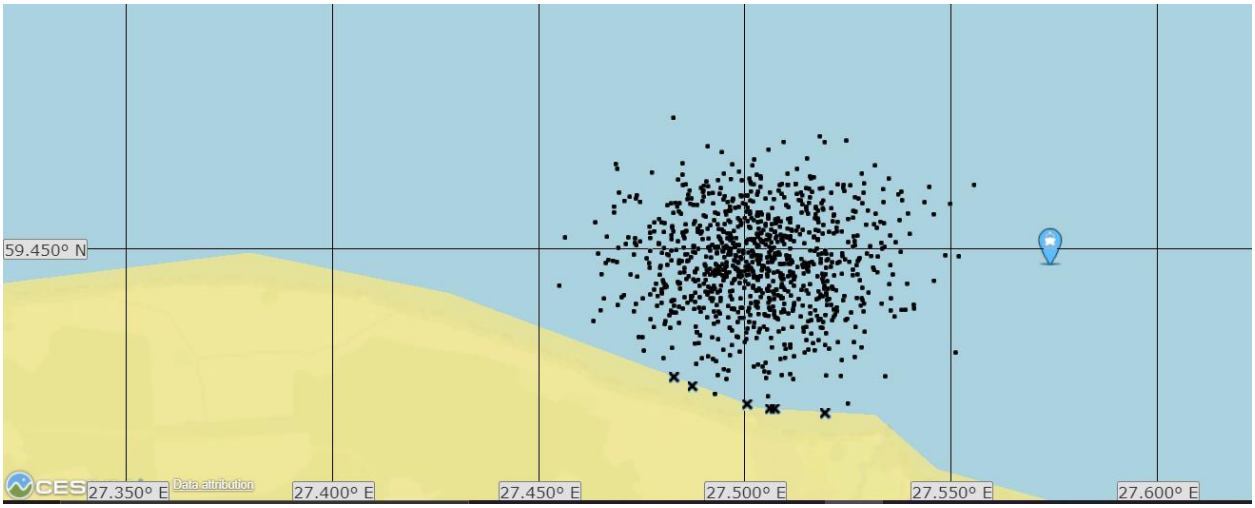


Рисунок 4.2 – Расчет в GNOME. 12 часов после начала разлива

По прошествии 12 часов пятно нефти, представленное набором частиц, переместилось на запад и часть частиц уже начало прилипать к берегу. При этом общая форма загрязнения похожа на круг.

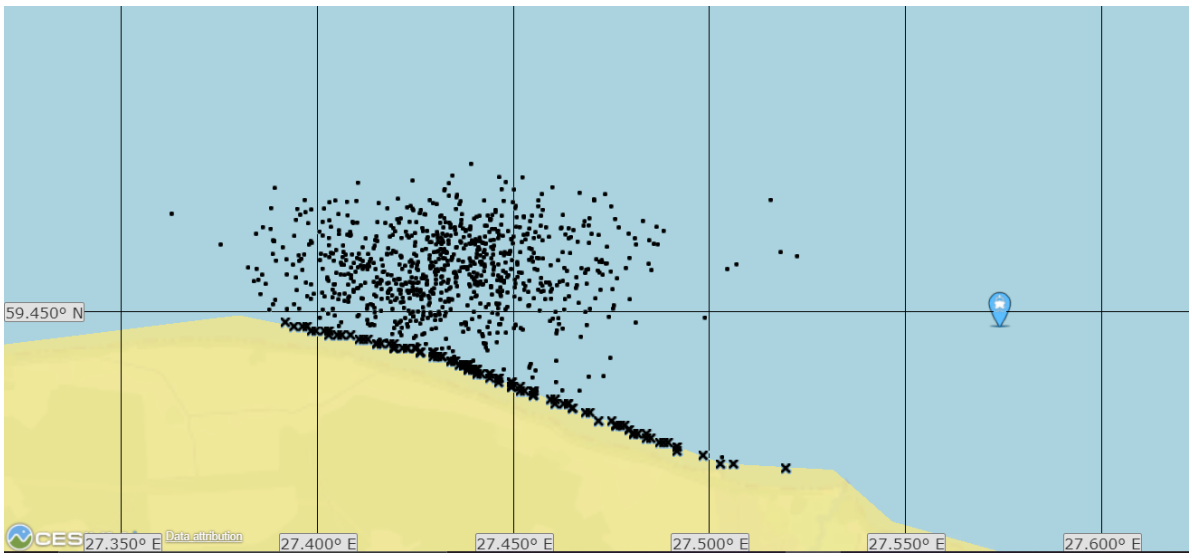


Рисунок 4.3 – Расчет в GNOME. 24 часа после начала разлива

К концу расчета видно, что при перемещении вдоль берега часть нефти оказывается “прилипшей” к берегу и не может продолжить свое движение. При этом пятно из оставшихся частиц вытянулось в зональном направлении

Далее был произведен расчет, в котором пятно нефти рассматривалось в качестве единого образования. Время распространения пятна – 24 часа, начальные координаты – 59.43 с.ш. и 27.57 в.д.

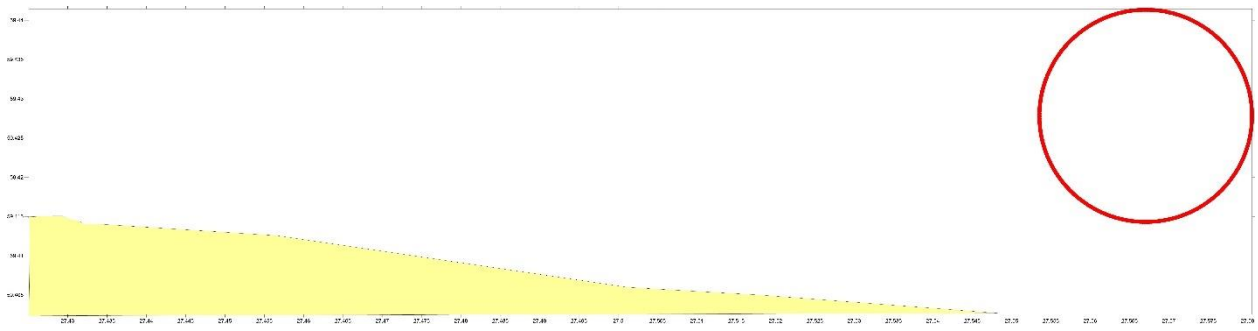


Рисунок 4.4 – Пятно как единое образование. Начальный момент времени

Уже наблюдается существенное отличие от предыдущего варианта. В начальный момент времени нефтяное загрязнение представлено в виде окружности. При этом сама окружность состоит из 500 точек связанных с друг с другом.

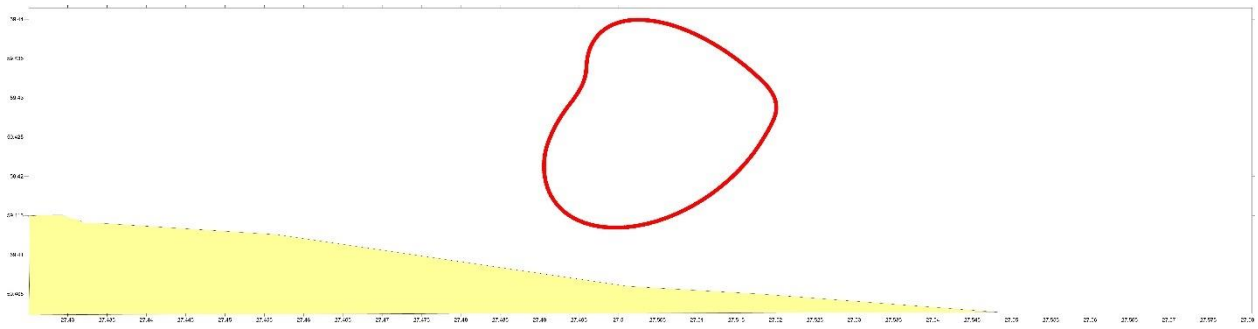


Рисунок 4.5 – Пятно как единое образование. 12 часов от начала разлива

Через 12 часов пятно нефти, изменяя свою форму под действием течений и ветра, передвигается на запад.

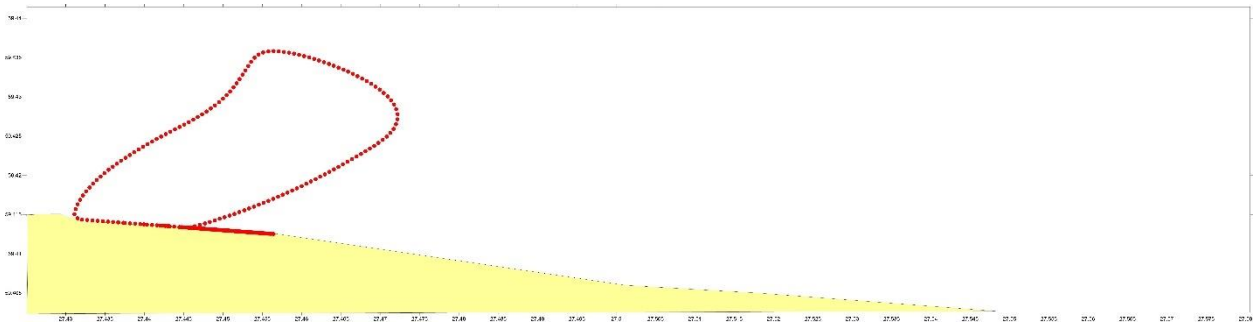


Рисунок 4.6 – Пятно как единое образование. 24 часа от начала разлива

Спустя время пятно нефти достигает берега, и можно увидеть начало прилипания нефти к берегу. При этом форма пятна вытягивается также в зональном направлении.

4.3 Второй эксперимент

Второй эксперимент было решено провести на открытой части акватории, т.к. это одно из наиболее вероятных мест разливов в связи с сбросом нефтепродуктов с судов и танкеров. Время распространения пятна – 24 часа, начальные координаты – 60.2 с.ш. и 27.33 в.д.

Как видно из полученной картинки в начальный момент времени пятно нефти сконцентрировано в одной точке. Пятно, также как и в первом эксперименте, представлено как 1000 отдельных частиц, каждой из которых предписан свой объем и координаты. Отклонения от ветра и течений осуществляется путем горизонтальной диффузии, которая задается пользователем.

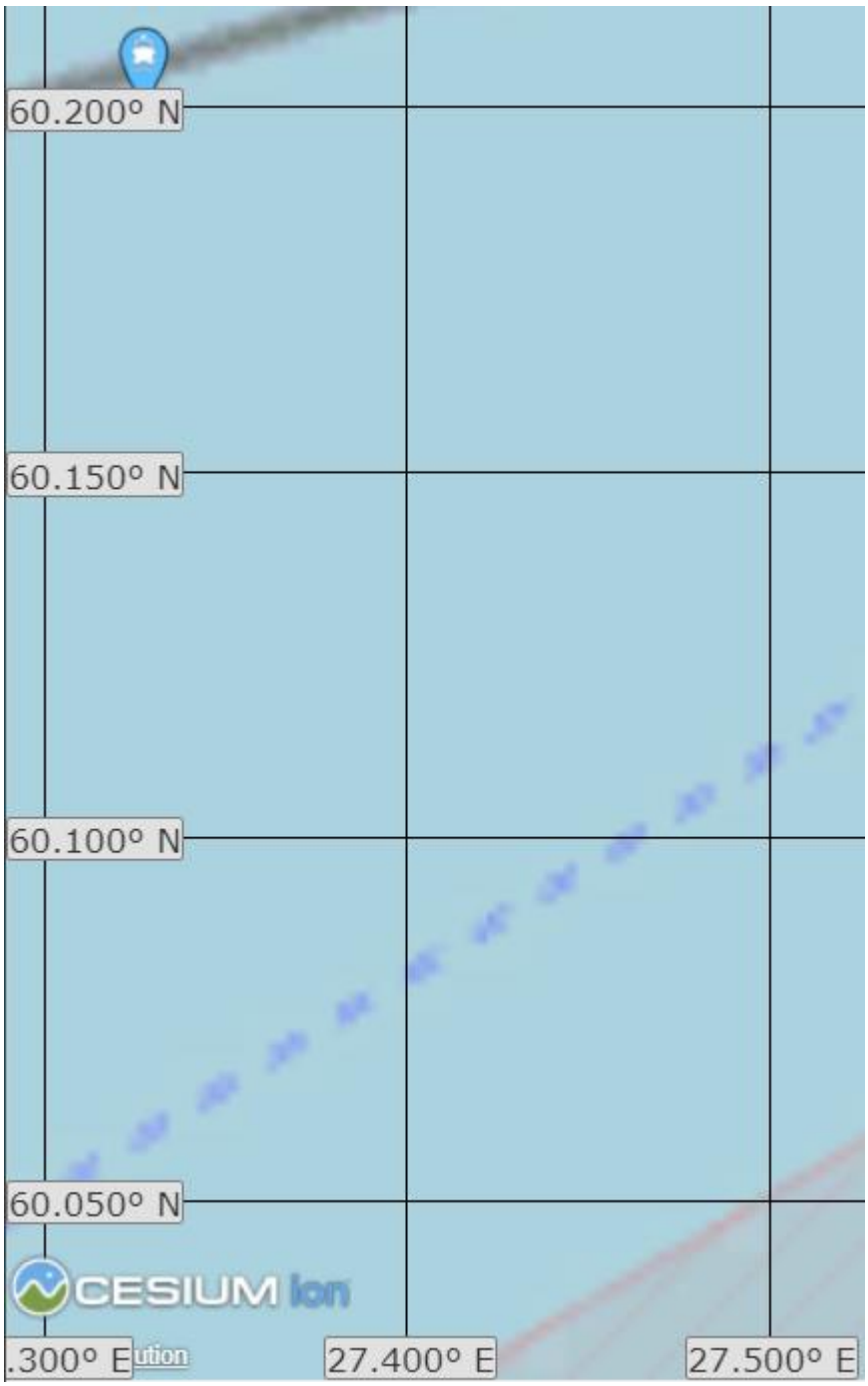


Рисунок 4.7 – Расчет в GNOME. Начальный момент времени

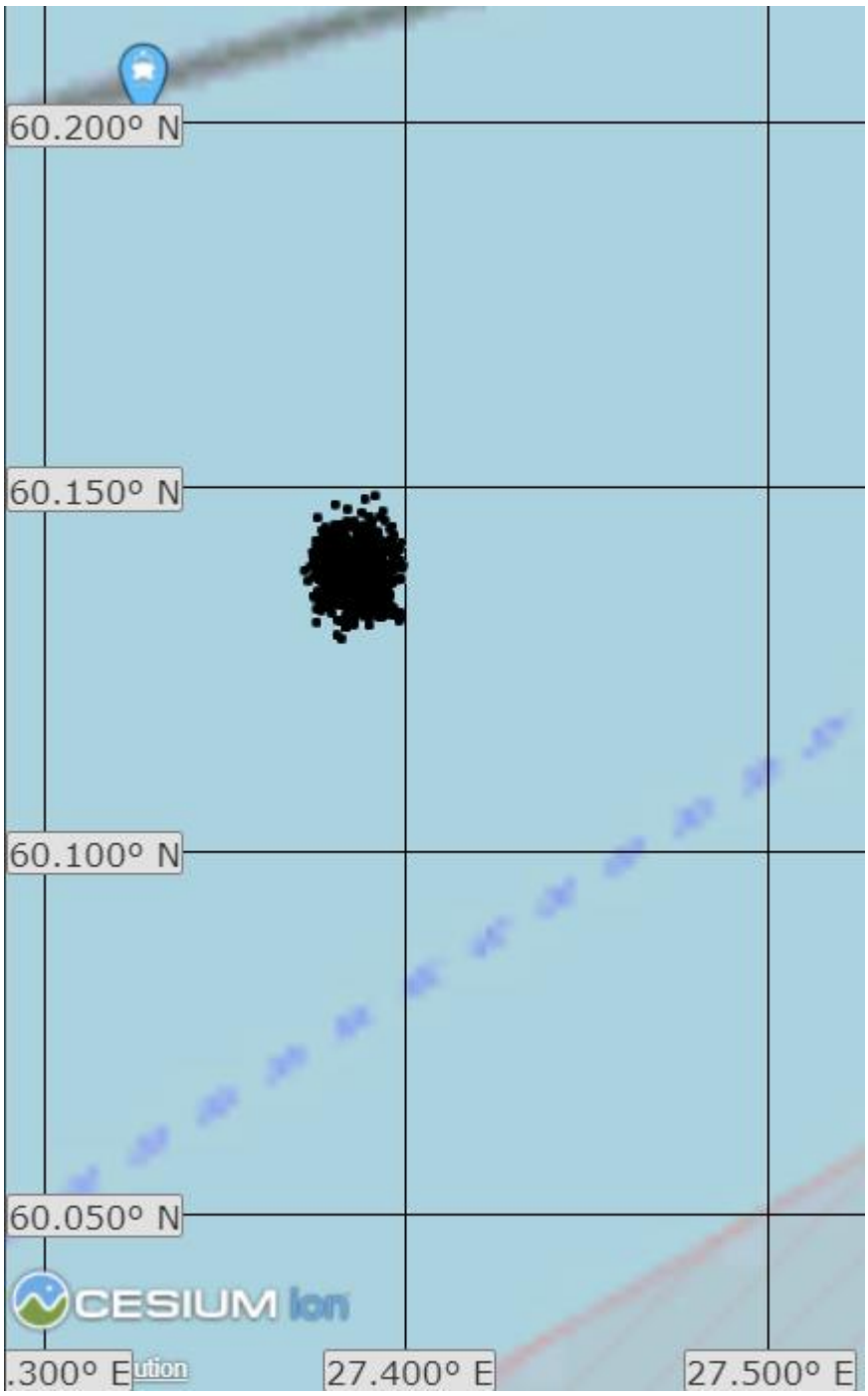


Рисунок 4.8 – Расчет в GNOME. 12 часов после начала разлива

Пятно, имеющее форму круга, передвигается на север. Степень диффузии мала.

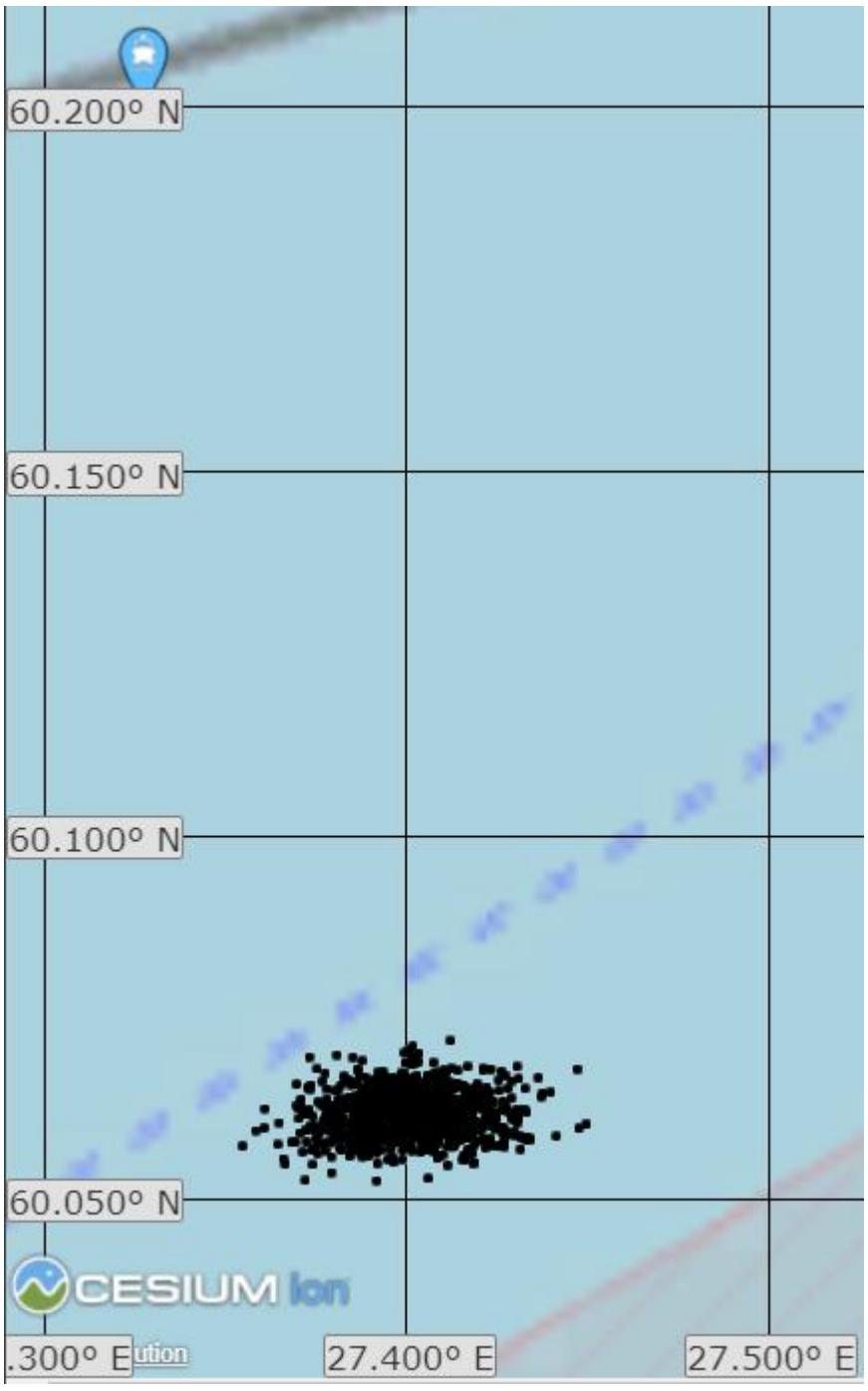


Рисунок 4.9 – Расчет в GNOME. 24 часа после начала разлива

К концу эксперимента пятно стало распространятся в горизонтальном направлении

Далее был произведен расчет, в котором пятно нефти рассматривалось в качестве единого образования. Время распространения пятна – 24 часа, начальные координаты – 60.2 с.ш. и 27.33 в.д

.

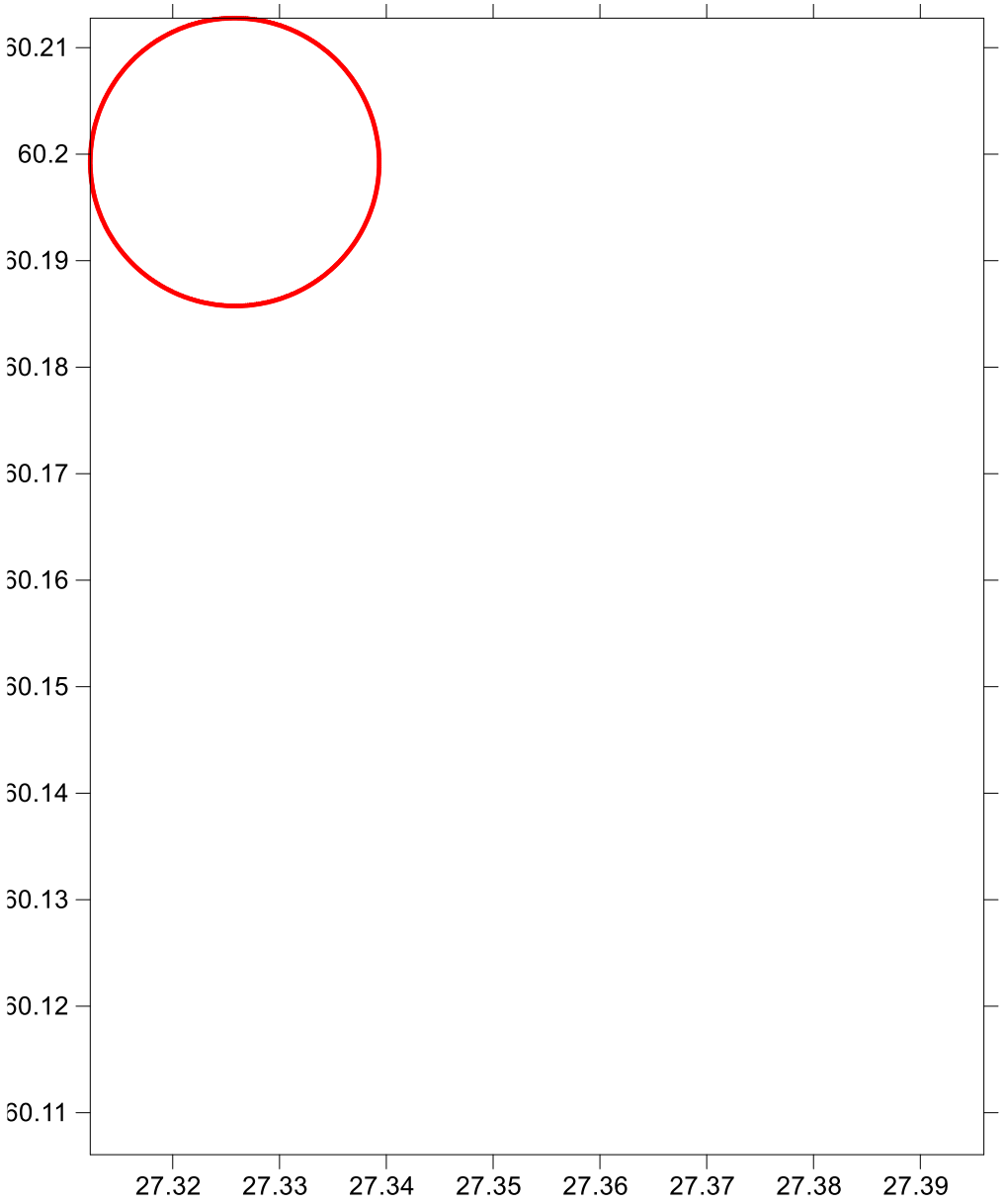


Рисунок 4.10 – Пятно как единое образование. Начальный момент времени

. В начальный момент времени нефтяное загрязнение представлено в виде окружности. При этом сама окружность состоит из 500 точек связанных с друг с другом.

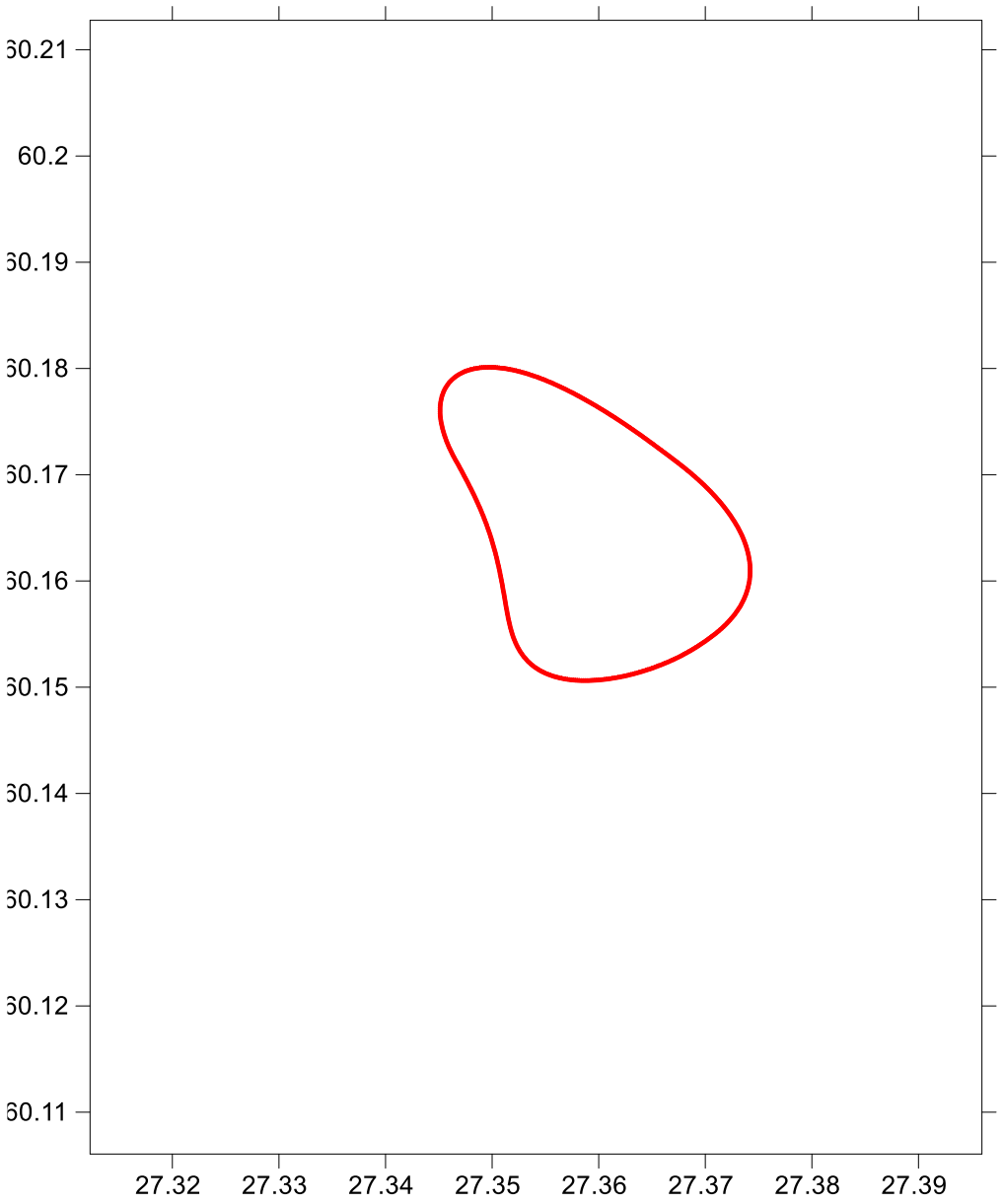


Рисунок 4.11 – Пятно как единое образование. 12 часов от начала разлива

Наблюдается изменение формы пятна при его движении на запад.

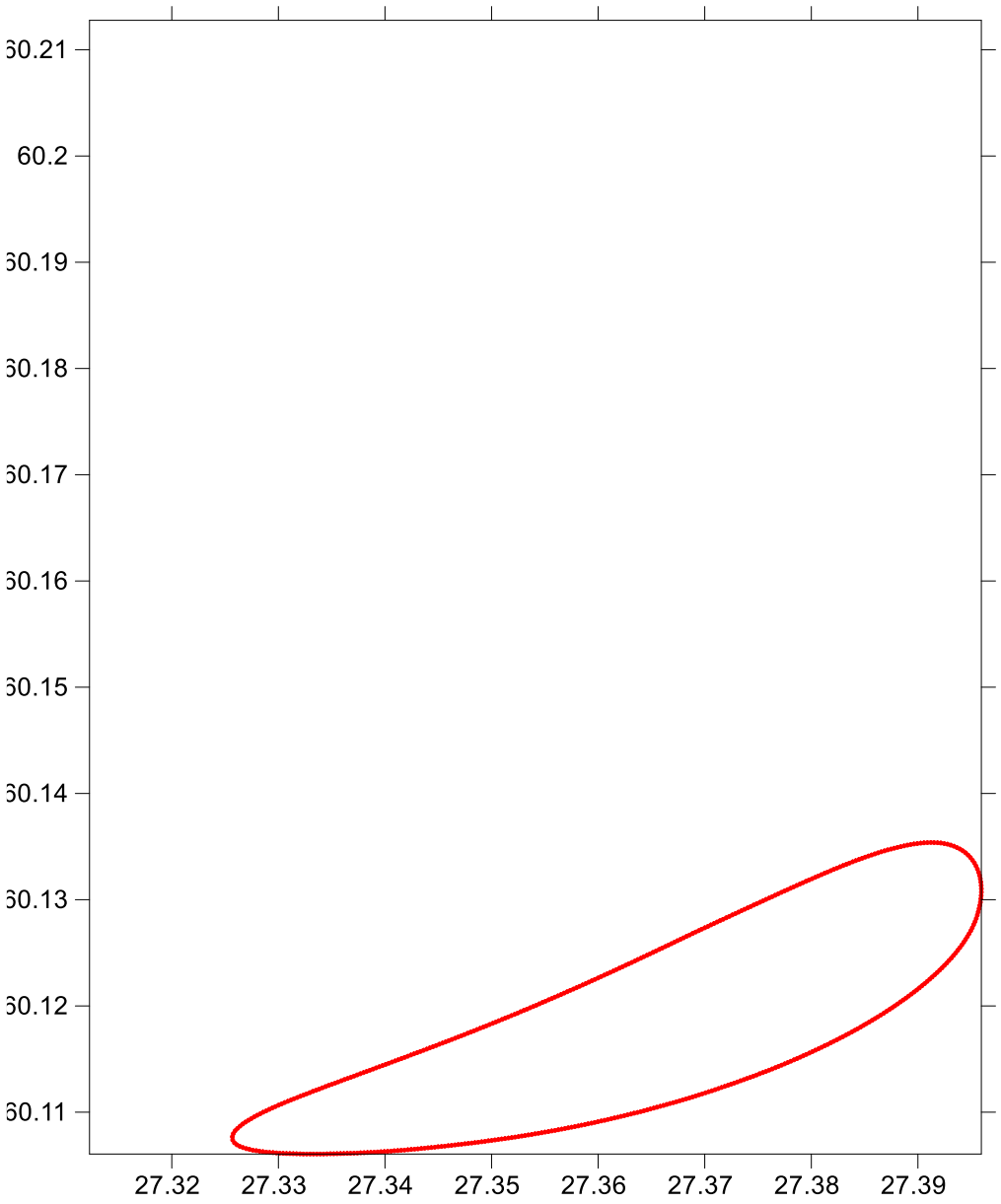


Рисунок 4.12 – Пятно как единое образование. 24 часа от начала разлива

Пятно растекается в горизонтальном направление. По сравнению с результатами, полученными по модели GNOME, пятно нефти прошло меньшее расстояние, и при этом имеет более вытянутую форму.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были достигнуты поставленные цели и задачи. Было проведено изучение Финского залива уязвимости к разливам нефти, выделены три основные зоны, в которых происходит основное распространения нефтяных загрязнения, отмечена тенденция на снижение общего количества разливов. Также были рассмотрены особенности океанической и атмосферной циркуляции залива.

Далее был произведен разбор существующих моделей и изложен принцип их работы. Модели эффективно описывают основные происходящие с нефтью физико-химические процессы, воспроизводят движение, распространение и эволюцию разлившихся нефтепродуктов.

В настоящее время нет теории исчисления вариаций сил межмолекулярных взаимодействий в жидком веществе посредством действия сильных трений другой жидкости. Поэтому необходимо рассчитывать движение пятна сырой нефти как единого образования.

Была произведена серия экспериментов, где пятно нефти рассматривалось как единое тело, его взаимодействие с берегом и его траектория движения.

Список использованных материалов

1. R. de la Huz, ... J. López, in Encyclopedia of Environmental Health, 2011
2. Progress in Operational Modeling in Support of Oil Spill Response Christopher H. Barker and others
3. International Hydrographic Organization. Limits of Oceans and Seas (Special publication № 23). 3rd edition
4. Владимирова О. М., Вклад растворенного органического вещества в баланс азота и фосфора в Финском заливе на основе математического моделирования. 2019
5. The physical oceanography of the Gulf of Finland: a review Pekka Alenius, Kai Myrbergand Alexei Nekrasov
6. Directional and extreme wind properties in the Gulf of FinlandTarmo Soomere, Sirje Keevallik
7. The Climate of the Baltic Sea Basin, Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities. Report No. 41. World Meteorological Organisation, Geneva, 1998.
8. Ansper, I. and Fortelius, C. HIRLAM-mudeli tuuleprognoosi hindamine Läänemerel. Publica-tiones Instituti Geographici Universitas Tartuensis, 2003
9. Andersson, H. C. Influence of long-term regional and large-scale atmospheric circulation on the Baltic Sea level. Tellus, 2002
10. Bill Freedman,6 - OIL POLLUTION,1995
11. Kostianoy A.G., Bulycheva E.V., Semenov A.V., Krainyukov A.V. (2015) Satellite monitoring systems for shipping, and offshore oil and gas industry in

the Baltic Sea // Transport and Telecommunication, 2015. Vol.16 (2), P. 117–126.

12. HELCOM (2016), HELCOM Annual report on discharges observed during aerial surveillance in the Baltic Sea, 2015

13. HELCOM (2020), HELCOM Annual report on discharges observed during aerial surveillance in the Baltic Sea, 2019

14. Данные по грузообороту. Администрация морских портов Балтийского моря,2021

15. Maritime traffic continues to grow in the Gulf of Finland. Finnish Environment Institute, 2020

16. Stephanie E. Chang, Jeremy Stone, Kyle Demes and Marina Piscitelli, Consequences of oil spills: a review and framework for informing planning, 2014

17. Сайт Национального управления океанических и атмосферных исследований. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://response.restoration.noaa.gov, свободный. (Дата обращения: 07.06.2022)

18. General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation Seattle, Washington, 2012

19. Сайт MEDSLIK-II. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.medslik-ii.org, свободный. (Дата обращения: 07.06.2022)

20. M. De Dominicis, N. Pinardi, G. Zodiatis, and R. Archetti, MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting – Part 2: Numerical simulations and validations 2013

21. M. De Dominicis, N. Pinardi, G. Zodiatis, and R. Archetti, MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting – Part 1: Theory, 2013

22. Сайт MOHID. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mohid.com (Дата обращения: 07.06.2022)

23. Valery Tchancev ANALISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA ONDA TEORICA DE LAS MAREAS Y ELABORACIÓN DE UNA ESQUEMA DE CALCULOS DE LOS PARÁMETROS DINAMICOS EN LA ENSENADA DE TUMACO. - Tumaco, Colombia 1999

24. О. В. Булатов, Т. Г. Елизарова, “Регуляризованные уравнения мелкой воды для численного моделирования течений с подвижной береговой линией”, Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 56:4 (2016), 665–684;

25. Valery Tchantsev COMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO DE LA ENSENADA DE TUMACO. - Tumaco, Colombia, 2000