

На правах рукописи

УДК: 502/504

Лохов Алексей Сергеевич

**РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИЙ ЗАПОЛЯРНОЙ ТУНДРЫ ПО СТЕПЕНИ
НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ ОТ РАЗЛИВОВ
НЕФТИ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И
ЭКСПЕРТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность: 25.00.36 - Геоэкология (науки о Земле)

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Диссертационное исследование выполнено на кафедре транспорта, хранения нефти, газа и нефтегазопромыслового оборудования, федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова».

Научный руководитель: **Губайдуллин Марсель Галиуллович**
доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой транспорта, хранения нефти, газа и нефтегазопромыслового оборудования, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова».

Официальные оппоненты: **Субетто Дмитрий Александрович**
доктор географических наук, профессор, декан факультета географии, заведующий кафедрой физической географии и природопользования ФГБОУ ВО «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена»

Кузнецов Андрей Николаевич
кандидат географических наук, доцент, директор Института наук о Земле ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2021 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.197.03 при ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98, Актный зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.rshu.ru/university/dissertations/> ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 192007, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79, Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет Д 212.197.03, Ученому секретарю.

Автореферат диссертации разослан «_____» _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.197.03
к. воен. н., доцент



Соколов А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В работе рассмотрены процессы, протекающие при аварийных разливах нефти на поверхности грунта в условиях Заполярной тундры. Показано, что наиболее важные из них – это растекание нефти по поверхности суши, её фильтрация в грунт и испарение в атмосферу. Разработана гидродинамическая модель, учитывающая эти процессы на основе уравнения диффузии и закона Дарси для горизонтальной поверхности, выполнена её численная реализация разностными методами. С целью определения интенсивности испаряемости нефти при её контакте с воздухом, проведен лабораторный эксперимент. Разработаны алгоритм и программа для расчета пространственно-временных масштабов аварийных разливов. На основе разработанной модели предложен метод оценки масштабов распространения нефтяного загрязнения на поверхности суши, в районах Заполярной тундры европейской части России. При этом такие важные факторы, как уклон поверхности земли и наличие водных объектов вблизи источника разлива, учтены при помощи, специально разработанной для данных условий экспертной модели оценки последствий для природной среды потенциального нефтяного разлива. На рисунке 1 представлена блок-схема, отражающая роль используемых в работе моделей и последовательность их применения.



Рисунок 1 – Блок-схема используемых в работе моделей и последовательность их применения.

В качестве апробации разработанной модели растекания нефти, выполнено районирование территории Ненецкого автономного округа (НАО) и в более детальном разрешении – нефтепровода «Варандей – Южное Хыльчую», позволяющее выявить зоны, наиболее подверженные негативному влиянию разливов нефти на природную среду. Разработан метод оценки масштабов загрязнения в зонах приливной осушки Арктических морей. В рамках решения этой задачи проведен

натурный эксперимент, имитирующий разлив нефти, целью которого была верификация модели разливов нефти на поверхности суши.

Актуальность темы исследования. По данным Росстата в 2018 году общая протяженность нефтепроводов и нефтепродуктопроводов в РФ составила – 70,5 тыс. км; в 2017 – 70,7; в 2016 – 70,8. Несмотря на незначительное уменьшение в последние годы, суммарная протяженность нефтепроводов и увеличение срока их эксплуатации, как в РФ, так и в других странах, обуславливают высокую степень вероятности возникновения аварий на данном типе объектов.

Несмотря на заметный прогресс в обеспечении безопасности добычи и транспортировки нефти и нефтепродуктов, как показывает практика, полностью безаварийная эксплуатация объектов нефтяной транспортной инфраструктуры, а в особенности нефтепроводов и нефтепродуктопроводов – невозможна. Так, по данным Минэнерго России на промысловых нефтепроводах Российской Федерации в 2015 году произошло 10544 случаев прорывов, в 2016 – 9599, в 2017 – 9472, в 2018 – 8126. Недобор нефти по этой причине составил 68; 125,4; 58; 54,9 тыс. т соответственно. Таким образом, за период 2015-2018 гг., средний объем пролившейся нефти на один разлив составил 8,1 т. Основной причиной аварий в 90-92% случаев является коррозия нефтепроводов. По данным Минприроды в 2016 году на предприятиях топливно-энергетического комплекса произошли 6 чрезвычайных ситуаций, в 2017 году – 1, в 2018 году – 8.

В работах М. Fingas, представлена следующая статистика. На сухопутных трубопроводах величина разлитой нефти хоть и неуклонно снижается – например, в США за период с 1998 по 2007 гг. на 35 % в сравнении с 1988-1997 гг., и на 75 % в сравнении с 1968-1977 гг., тем не менее, ежегодно фиксируется порядка двухсот аварий. При этом в окружающую среду попадает в среднем 11 тыс. т нефти в год, т.е. порядка 55 т на один разлив. Это достаточно значимые величины, чтобы причинить значительный ущерб окружающей среде, пусть на местном и локальном уровнях, в особенности для рассматриваемого в работе региона Заполярной тундры, характеризующегося высокой уязвимостью.

Разлив нефти на поверхности суши – сложное явление, при котором можно наблюдать множество физико-химических процессов. Наиболее важными, с точки зрения оценки потенциального ущерба окружающей среде, являются: растекание по поверхности, фильтрация в грунт и испарение с поверхности нефтяной пленки (Солнцева, 1998). Процесс растекания определяется, в первую очередь, рельефом поверхности, а также физическими свойствами разлитой нефти. Для процесса фильтрации наиболее важными являются свойства грунта, такие как нефтеемкость и скорость просачивания, характеризуемая коэффициентом фильтрации. Некоторые типы грунтов могут впитывать нефть до половины собственного объема, в зависимости от их свойств. При подсчете количества испарившейся с поверхности пленки нефти необходимо учитывать характеристики среды, такие как температура подстилающей поверхности и воздуха, скорость ветра, а также характеристики флюида – температура, вязкость.

Несмотря на имеющиеся работы, посвященные различным моделям разливов нефти на суше, комплексных, готовых к практическому применению моделей на основе гидродинамических уравнений, нет. Нормативные документы в данном случае

дают грубую оценку, не учитывая многих факторов. В свою очередь, вопрос о моделировании разливов нефти на водной поверхности Арктического шельфа проработан достаточно хорошо (Губайдуллин и др., 2016 и др.). Существуют программные комплексы, позволяющие учесть практически все аспекты моделирования. Физико-химические процессы, происходящие при разливах на суше и на водной поверхности (Бескид и др., 2011), существенно отличаются друг от друга, поэтому использование этих разработок в данном случае невозможно. Это направление может служить примером пути развития в области моделирования разливов нефти на поверхности суши.

В рамках диссертационной работы предложен метод оценки масштабов нефтяного загрязнения в зонах приливной осушки. Данный вопрос является не менее актуальным, так как моделирование и оценочные расчёты распространения нефти по морской акватории при аварийных разливах показывают, что именно прибрежные участки являются одними из наиболее поражаемых объектов. При этом наиболее уязвимыми являются устьевые области, куда нефть попадает как со стороны моря, так и со стоком речных вод.

Исходя из обзора литературы и подробного анализа процессов, наблюдаемых при аварийных разливах нефти на поверхности суши в условиях Заполярной тундры, можно заключить, что для оценки пространственно-временных масштабов нефтяного загрязнения на поверхности суши необходима основанная на гидродинамических уравнениях модель с возможностью использования эмпирической зависимости интенсивности испарения от времени.

Районирование – важный метод зонирования территорий по конкретным признакам, «Это наиболее надежный путь к управлению территориальной организацией совокупностей явлений в природе и обществе» (Краснов и др., 2009). Его применение в задаче оценки степени негативного влияния на природную среду от разливов нефти позволяет представить большой массив результатов расчетов в удобном для восприятия и анализа виде. В работе представлен метод районирования территорий Заполярной тундры применимый как для крупных территорий, для локальных объектов – месторождений, резервуарных парков так и линейных объектов – нефтепроводов. Метод апробирован на территории Ненецкого автономного округа, а также для нефтепровода «Южное Хыльчую – Варандей», расположенного на его территории, в более детальном разрешении. По результатам районирования сделаны выводы о необходимом расположении средств ликвидации разливов нефти в этом регионе.

Оценки степени негативного воздействия на природную среду от разливов нефти необходимы, в первую очередь, для планирования действий по ликвидации последствий, а именно, для выбора мест базирования средств их ликвидации. С другой стороны, эти оценки можно использовать при проектировании объектов нефтяной промышленности для выбора наиболее благоприятных условий, с точки зрения минимизации потенциального ущерба окружающей среде. Районирование территорий, является наиболее подходящей формой представления результатов в контексте данных задач. Полученные в работе результаты могут быть использованы как входные данные в методиках оценки георисков и управления территориями (Истомин, Новиков и др., 2019; Истомин, Петров и др., 2019), в том числе такими

крупными как Ненецкий автономный округ. Например, существует специализированная система подобного рода для поддержки принятия решений при разливах нефти на акваториях (Бескид и др., 2013).

Объект исследования. Негативное влияние аварийных разливов нефти на природную среду территорий Заполярной тундры, включая приливные осушки рек Арктических морей.

Предмет исследования. Процессы растекания, фильтрации в грунт и испарения нефти в атмосферный воздух, происходящие при аварийных разливах, факторы рельефа местности и наличия водных объектов и их влияние на масштабы воздействия на природную среду.

Соответствие паспорту заявленной специальности. Диссертационное исследование соответствует специальности 25.00.36 – «Геоэкология», в области исследований «Науки о Земле», по пунктам 1.14 – «Моделирование геоэкологических процессов» и 1.17 – «Геоэкологическая оценка территорий. Современные методы геоэкологического картирования, информационные системы в геоэкологии. Разработка научных основ государственной экологической экспертизы и контроля», что соответствует отрасли географических наук.

Цель исследования. Районирование территорий Заполярной тундры по степени негативного воздействия на природную среду от разливов нефти путем разработки гидродинамической модели разливов нефти на поверхности суши и применения экспертных технологий для учета других влияющих факторов.

Исходя из поставленной цели, сформулированы следующие **задачи**:

1. Изучение природных и климатических условий Заполярной тундры, влияющих на растекание нефти на поверхности тундровой зоны.

2. Анализ существующих методов прогнозирования последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов для различных типов источников загрязнения.

3. Разработка гидродинамической модели разливов нефти на земной поверхности, учитывающей три основных физических процесса, проистекающих при разливах нефти: растекание, фильтрация в грунт и испарение. Постановка эксперимента, позволяющего установить скорость испарения нефти, с целью получения её эмпирической зависимости.

4. Анализ результатов расчетов для наиболее вероятных сценариев аварийных разливов нефти для различных типов грунтов и источников разлива, на основе разработанной модели.

5. Разработка метода оценки пространственно-временных масштабов распространения нефти на приливной осушке Арктических морей. Постановка эксперимента, имитирующего разлив нефти для этих условий и верификация модели на его основе.

6. Районирование территории НАО по степени негативного воздействия на природную среду, обусловленного возможными аварийными разливами нефти в условиях Заполярной тундры, на основе расчетов, выполненных при помощи разработанной модели и экспертных технологий.

Научная новизна. 1. Разработана новая гидродинамическая модель для оценки пространственно-временных масштабов разлива нефти на поверхности суши Заполярной тундры в период отсутствия снежного покрова. Особенностью модели

является одновременный расчет трех основных процессов, протекающих при разливах нефти: растекания нефти (уравнение диффузии); фильтрации в грунт (закон Дарси); испарения в атмосферу (полученная на основе эксперимента эмпирическая зависимость). Задача учета таких важных параметров как уклон поверхности и наличие водоёмов вблизи источника загрязнения решена при помощи экспертных оценок (технологий), заключающихся в определении влияющих факторов, присвоении им весовых коэффициентов, и последующим расчетом интегрального показателя опасности потенциального загрязнения.

2. Получены оценки пространственно-временных масштабов нефтяного загрязнения на поверхности суши Заполярной тундры, рассчитанные при помощи разработанной автором новой гидродинамической модели. В качестве их характеристик используются параметры площади и радиуса загрязнения, и их зависимость от времени.

3. Впервые предложен метод оценки масштабов аварийного разлива нефти в таких сложных, с точки зрения моделирования условиях, как разлив в зонах приливной осушки (периодически затопляемой и осушаемой акватории) Белого моря, с последующим смывом пятна приливной волной. Он заключается в синтезе моделей разливов нефти на суше (на фазе отлива) и диффузии примесей в воде (на фазе прилива). Проведенный автором эксперимент, имитирующий разлив нефти в зоне приливной осушки, и выполненная на его основе верификация гидродинамической модели разливов нефти на поверхности суши показала высокую степень сходимости его результатов с модельными расчетами.

4. На основе проведенных исследований, выполнено районирование по степени опасности потенциального нефтезагрязнения территории заполярной тундры НАО, и более детально, для нефтепровода «Южное Хыльчую - Варандей». Результаты районирования позволяют выявить зоны потенциального риска, обусловленные негативным воздействием на природную среду возможных разливов нефти. Разработанную методику и результаты районирования рекомендуется использовать при выборе месторасположения, как самих объектов инфраструктуры, так и станций базирования различных средств ликвидации разливов, с целью наиболее оперативного реагирования на аварийные ситуации.

Теоретическая и практическая значимость.

Предложенная в работе модель основана на гидродинамических уравнениях, имеет модульную структуру и, благодаря этому, большой потенциал для дальнейшего дополнения и совершенствования. Она позволяет прогнозировать пространственно-временные масштабы последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, разрабатывать на основе этих оценок планы по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти. Результаты моделирования и районирования территории могут быть применены при выборе оптимального, с точки зрения опасности потенциального загрязнения, места размещения объектов нефтяной инфраструктуры и при выборе месторасположения сил и средств по ликвидации аварийных разливов нефти.

Положения, выносимые на защиту.

1. Разработана объемная модель аварийных разливов нефти на поверхности суши, основанная на численных методах решения гидродинамических уравнений, и

учитывающая процессы растекания нефти по поверхности, её фильтрации в грунт и испарения в атмосферу.

2. Методика и результаты районирования территории Заполярной тундры НАО, позволяющие на основе расчетов, выполненных при помощи разработанной гидродинамической модели и экспертных технологий, прогнозировать участки наиболее подверженные негативному воздействию в случае аварийных разливов нефти и принимать необходимые решения для размещения мест базирования средств ликвидации разливов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность диссертационной работы определяется использованием фундаментальных уравнений гидродинамики и результатами проведенных натуральных и вычислительных экспериментальных исследований.

Результаты диссертационного исследования были представлены на следующих конференциях: Международная научно-практическая конференция «Перспективы и проблемы освоения месторождений нефти и газа в прибрежно-шельфовой зоне Арктики России» (Архангельск, 2015); XXI Международная научная конференция-школа по морской геологии, Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова (Москва, 2015); Научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов САФУ «Развитие Северо-Арктического региона: проблемы и решения» (Архангельск, 2016); Научно-практическая конференция аспирантов САФУ «Методы и экологически безопасные инновационные технологии освоения нефтегазовых месторождений западной части Арктического шельфа и приарктических территорий» (Архангельск, 2019); XXIII Международная научная конференция-школа по морской геологии, Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова (Москва, 2019); Всероссийская конференция с международным участием «Глобальные проблемы Арктики и Антарктики», (Архангельск, 2020).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 13 научных работах, из них 6 – в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, в том числе 2 в журналах, входящих в базы данных WoS и/или Scopus.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 135 наименований. Материал диссертации изложен на 128 страницах машинописного текста, содержит 25 рисунков и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, показана теоретическая и практическая значимость работы и сформулированы защищаемые положения.

Нефтяная инфраструктура НАО располагается в его восточной части, на рисунке 2 приведена схема её основных объектов. Крупнейшим является Варандейский береговой резервуарный парк, расположенный вблизи береговой линии юго-восточной части Баренцева моря. Суммарная протяженность отображенных на схеме нефтепроводов составляет 1265 км, данный подсчет не учитывает наличие нескольких веток на одном нефтепроводе, а также некоторые небольшие, строящиеся и проектируемые нефтепроводы.

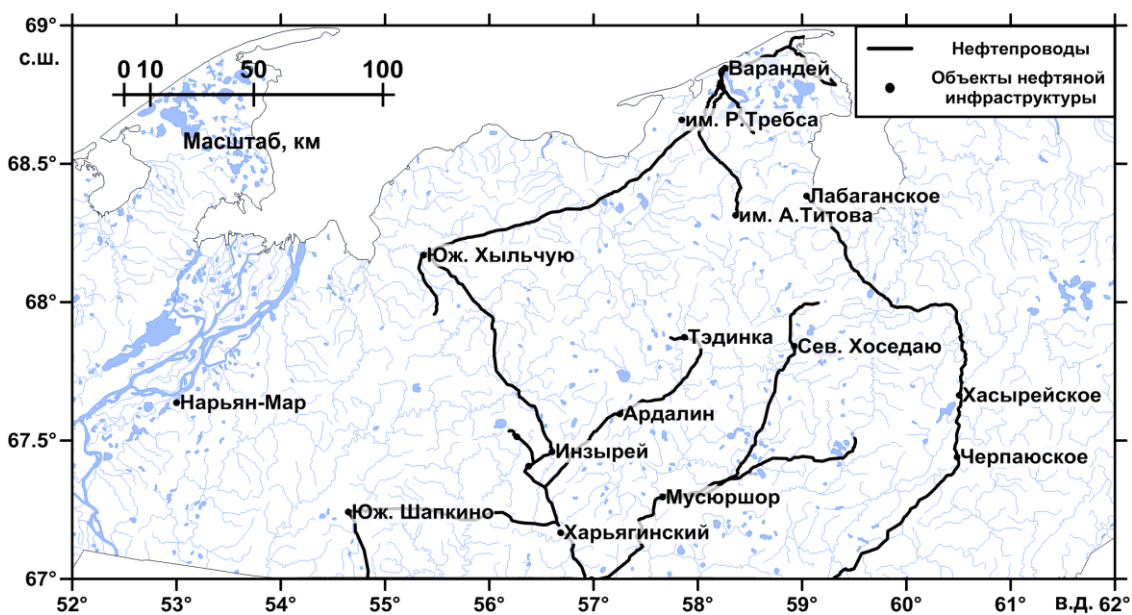


Рисунок 2 – Схема расположения основных объектов нефтяной инфраструктуры Ненецкого автономного округа.

В **первой** главе дано описание природных условий Заполярной тундры европейской части России. В ней имеются следующие разделы: географическое положение, геологическое строение и рельеф, климат, поверхностные воды, почвы, растительность. Основной акцент уделен тем особенностям природной среды, которые наибольшим образом влияют на физико-химические процессы, происходящие при аварийных разливах нефти.

Рассматриваемый регион расположен в арктическом и субарктическом климатических поясах. Для них характерной особенностью является наличие полярного дня и ночи, что приводит к существенной неравномерности распределения солнечной радиации по временам года. Районы Заполярной тундры в Европейской части России предствлены на северном побережье Кольского полуострова, на полуострове Канин, в Большеземельской и Малоземельской тундрах и многочисленных островах и архипелагах Белого и Баренцева морей (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Фрагмент карты «Зоны и типы поясности растительности» масштаба 1:30 000 000 (Национальный атлас РФ, 2004).

Другой важной природной особенностью этого региона является наличие большого количества водных объектов – рек, озер и болот, что повышает опасность

загрязнения природной среды разлившейся нефтью. Исходя из произрастающих в Заполярной тундре типов растительности, можно утверждать, что разлив нефти на поверхности суши нанесет значительный ущерб, уничтожив её большую часть в местах разлива. Он также усугубляется длительным естественным восстановлением хрупких экосистем тундры. Необходимо отметить, произрастающий на данной территории лишайник ягель, составляющий основу кормовой базы для оленеводства. Этот лишайник уязвим к техногенному воздействию, так как растет очень медленными темпами, увеличиваясь в высоту на несколько миллиметров в год, поэтому аварийный разлив нефти может нанести существенный ущерб местной сельскохозяйственной отрасли, основой которой является оленеводство.

На основе анализа почвенных карт сделан вывод о том, что самыми распространенными здесь типами почв являются торфяники с различной мощностью слоя и степенью разложения. Характерной особенностью этой территории является наличие локальных неровностей рельефа шириной и длиной от нескольких десятков сантиметров до нескольких десятков метров (кочкарные и бугристые тундры, полигональные болота). В торфяных почвах в летний период глубина сезонного оттаивания составляет порядка 1 м. В данном регионе многолетнемерзлые породы могут служить барьером при проникновении нефти в грунт.

Суровый климат, высокая обводненность и другие особенности природных условий, а также хрупкость экосистем Заполярной тундры являются осложняющими начальными условиями процесса моделирования.

Во **второй главе** дан обзор литературы по теме исследования. Проведено сравнение методик расчета площадей загрязнения, рекомендуемых в нормативной документации. Основным принципом оценки по ним является определение средней толщины нефтяной пленки и деление на этот показатель общих объемов разлившейся нефти. В большинстве методик толщина пленки вычисляется по эмпирическим данным в зависимости от условий разлива (вязкости нефти, типа поверхности и других). Этот метод позволяет получить довольно грубую оценку возможной площади разлива, но в тоже время с минимальными трудозатратами.

Изучением разливов нефти занимались Пиковский Ю. И., Кормак Д., Солнцева Н. П., Немировская И.А., Мансуров М.Н., Сурков Г.А., Fingas M. и др. Труды Д. Кормака и И.А. Немировской посвящены изучению распространения и накопления нефти в океане. М.Н. Мансуров и др. (2004) опубликовали обширную монографию по ликвидации аварийных разливов нефти в ледовых морях. Н.П. Солнцева известна работами в области миграции, метаболизма и закрепления нефти в почвах. Ю.И. Пиковский проводил комплексные исследования углеводородов в биосфере и литосфере, является автором нескольких известных учебных пособий. Канадский ученый M. Fingas работает над комплексными исследованиями разливов нефти и других загрязнителей в природную среду. Важное место в работе занимает теория фильтрации, основу которой заложили Дарси А., академики Лейбензон А. С. и Павловский Н. Н.

Представлен обзор существующих подходов к моделированию разливов нефти на поверхности суши: ГИС-модели, эмпирические и строго дифференциальные модели. Проанализированы их преимущества и недостатки. Принципиальным отличием ГИС-моделей аварийных разливов нефти является применение метода

«линий тока», в котором, на основе данных о рельефе вычисляются линии тока – направления движения нефтяной пленки. Затем подбираются глубина и ширина потока в соответствии с расходом источника. Преимуществом данного метода является подробный учёт рельефа местности, водных объектов и различных объектов инфраструктуры, при помощи ГИС (географических информационных систем).

С математической точки зрения, для задачи моделирования растекания жидкости по поверхности существуют решения с различной степенью упрощения, которая достигается в основном за счет уменьшения размерности рассматриваемого пространства. Трёхмерная постановка данной задачи практически не используется ввиду её высокой вычислительной сложности. Исходя из этого, а также из высокой сложности описываемых физико-химических процессов (многокомпонентного состава нефти, неоднородной структуры грунтов) можно заключить, что для оценки пространственно-временных масштабов нефтяного загрязнения на поверхности суши необходима основанная на гидродинамических уравнениях модель, с возможностью использования эмпирической зависимости интенсивности испарения. Другим вытекающим отсюда выводом, является то, что нельзя ориентироваться лишь на аналитические решения уравнений, так как это требует значительных допущений к исходным уравнениям. В отдельный раздел вынесен обзор методов прогнозирования скорости испарения нефти.

Несмотря на имеющиеся работы, посвященные различным моделям разливов нефти на суше, комплексных, готовых к практическому применению моделей на основе гидродинамических уравнений, нет.

Проведен обзор моделей в смежной области – разливов нефти на водной поверхности. Этот вопрос проработан достаточно хорошо, существуют программные комплексы, такие как OSCAR (SINTEF, Норвегия) и SPILLMOD (ГОИИ, Россия), позволяющие учесть все аспекты моделирования. Данное направление может служить примером пути развития в области моделирования разливов нефти на поверхности суши.

В **третьей главе** дано подробное описание гидродинамической модели разлива нефти на поверхности суши, предлагаемой автором. Рассмотрены основные процессы, происходящие при разливах: растекание и испарение нефти, фильтрация нефти в грунт. Представлено их физическое описание и математическая интерпретация. Основное уравнение модели имеет следующий вид (одномерный вариант уравнения впервые был предложен Кучментом Л. С. в 1980 году):

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \text{div}(D \text{ grad } h) + Q, \quad (1)$$

где: t – время, x, y – пространственные координаты $h = h(t, x, y)$ – толщина нефтяной пленки, $D = D(h)$ – функция определяющая скорость распространения флюида, Q – функция источника и стоков, имеющая следующий вид:

$$Q(t, x, y) = Q_1 - Q_2 - Q_3, \quad (2)$$

где: Q_1 – точечный источник, определяющий расход нефти из трубопровода; Q_2, Q_3 – стоки, представляющие потери нефти от фильтрации в грунт и испарения соответственно.

Фильтрация нефти в грунт описывается при помощи закона Дарси, имеющего в применении к данной задаче следующий вид:

$$v = k \left(1 + \frac{\rho g h}{p_0} \right), \quad (3)$$

где: v – скорость проникновения нефти в грунт, м/с; k – коэффициент фильтрации, м/с; h – толщина пленки нефти на поверхности грунта, м; p_0 – атмосферное давление, Па; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность нефти, кг/м³.

Процесс фильтрации ограничен способностью грунта впитывать нефть–нефтеемкостью, которая в свою очередь зависит от его влажности и пористости. Коэффициент фильтрации для различных типов грунтов определялся в соответствии с литературными данными Полубаринова-Кочина П.Я. и Нестерова М. В.

В данной главе описан проведенный лабораторный эксперимент по определению интенсивности испарения нефти, по результатам которого для нефти вязкостью 3,545 сСт и плотностью 813,9 кг/м³, автором получены эмпирические зависимости испаряемости и вязкости от времени:

$$E = 2.28 + 0.91 \cdot \ln(t + 0.008), \quad (4)$$

$$\mu(t) = \mu_0 + 3.559\sqrt{t}, \quad (5)$$

где: E – испаряемость, %; t – время, сутки; μ – вязкость нефти, сСт; μ_0 – вязкость нефти в начальный момент времени, сСт.

Процесс испарения нефти описывается при помощи эмпирической зависимости для каждого конкретного состава нефти, так как она является многокомпонентной жидкостью и её интенсивность испарения зависит от уникального фракционного состава.

Отдельный параграф посвящен численной и программной реализации модели. Основное уравнение модели (формула 1) аппроксимировано неявной разностной схемой, в результате которой на каждой итерации алгоритма решается система линейных алгебраических уравнений, путем разбивки на блочную матрицу. Потери нефти от фильтрации и испарения вычисляются как стоки. Алгоритм расчета сценариев реализован в виде консольного приложения на языке программирования C/C++.

Необходимо отметить, что разработанный вычислительный алгоритм применим только в случае горизонтальной поверхности, в тоже время, уравнения модели возможно использовать и при произвольной поверхности. Уклон поверхности – важная характеристика, которую нельзя не учитывать при прогнозировании масштабов загрязнения, подробнее о том, как была решена эта задача, рассматривается в главе 5.

В **четвертой** главе рассмотрены возможные диапазоны изменения характеристик, необходимых для расчета модели. Разработаны сценарии аварийных разливов нефти, проведены вычислительные эксперименты по ним и проанализированы их результаты.

Все характеристики необходимые для расчетов, условно можно разделить на три группы: 1. характеристики источника (функция расхода источника); 2. характеристики нефти (начальная вязкость, плотность, коэффициенты зависимостей по вязкости и испарению); 3. характеристики грунта (коэффициент фильтрации, нефтеёмкость, максимальная глубина проникновения нефти в грунт, шероховатость поверхности).

На рисунке 4 представлен пример расчета сценария разлива 100 т нефти на торфяном (а) и глинистом (б) грунте с различными значениями нефтеемкости. Так как процесс растекания нефти по поверхности активен ещё долгое время после закрытия источника, кривая площади загрязнения со временем выходит на асимптоту.

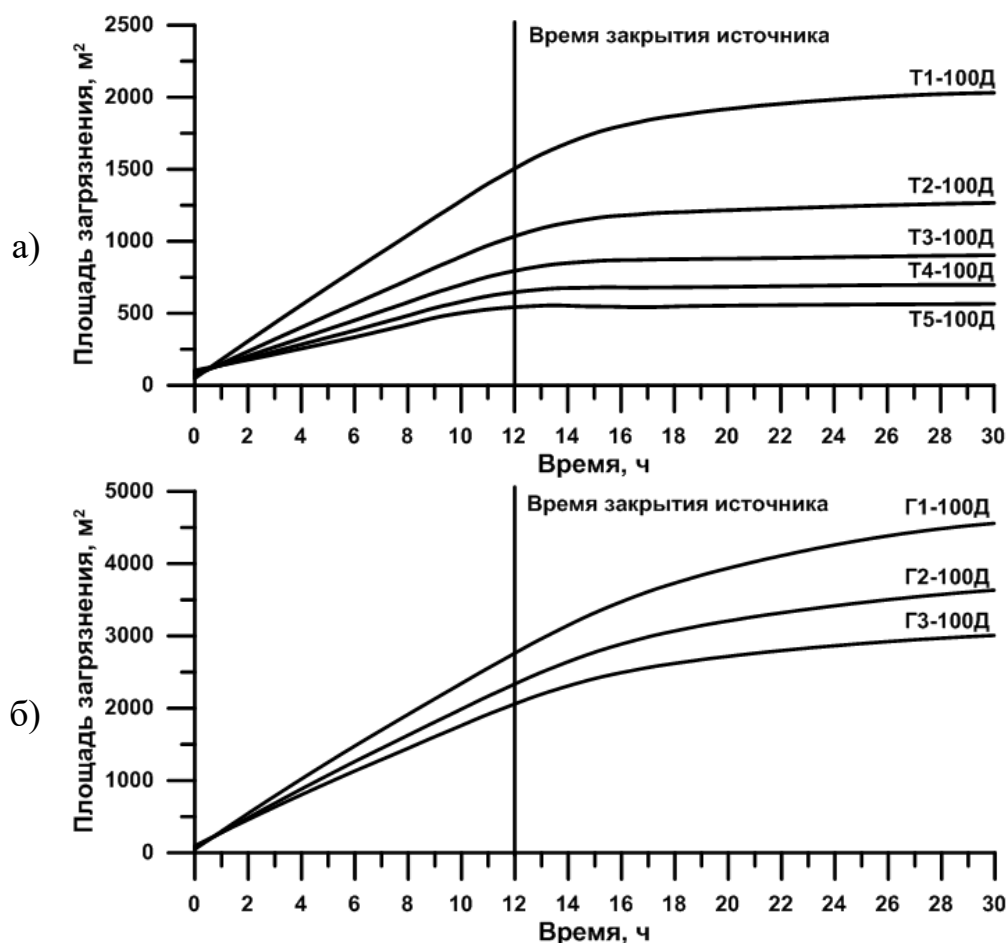


Рисунок 4 – График площади загрязнения в случае разлива 100 т нефти за 12 часов на: а) торфяном грунте с нефтеёмкостью от 0,1 (Т1-100Д) до 0,5 (Т5-100Д); б) глинистом грунте с нефтеёмкостью от 0,04 (Г1-100Д) до 0,2 (Г3-100Д).

В таблице 1 представлены основные результаты вычислительных экспериментов, имитирующих разливы нефти на поверхности суши по 13 разработанным сценариям. Расчеты проведены для трех типов грунтов с различной нефтеемкостью, и для трех режимов истечения. Разработанная модель позволяет производить расчеты не только для проливов нефти из нефтепроводов, но и для прорывов на скважинах, разливов из различных резервуаров, так и более масштабных аварий на нефтепроводах. Разливы нефти из нефтепроводов в количестве до 100 т являются наиболее вероятными для рассматриваемой в работе территории, но в тоже время не единственно возможными.

В работе были проведены расчеты для разливов 100/1000/5000/10000 тонн нефти в течение 24 ч, для двух случаев. В первом рассматривался торфяной грунт с максимальной нефтеемкостью (слаборазложившийся торф с минимальной обводнённостью), во втором – глинистый грунт с минимальной нефтеемкостью (плотный глинистый грунт с высокой обводнённостью), которые можно рассматривать как предельные оценки «снизу» и «сверху». Это позволило получить

диапазон возможных оценок площадей разливов, и эмпирическую зависимость радиуса разлива нефти от её количества, для «грубой» оценки площади загрязнения.

Таблица 1 – Основные результаты вычислительных экспериментов для сценариев разлива 100 т нефти (k_0 – проницаемость, Д; $h_{пр}$ – макс. глубина проникновения нефти, м; v – нефтеёмкость; типы грунтов: Г – глинистый; Т – торфяной; П – песчаный)

Тип грунта	k_0 , Д	$h_{пр}$, м	v	Площадь загрязнения, м ²		
				Разлив 100 т нефти за 12 ч	Разлив 100 т нефти за 1,69 ч	Разлив 100 т нефти за 1 мин
Г	1	0,1	0,04	4598	4475	4560
			0,12	3677	3585	3682
			0,2	3061	2995	3088
Т	5	0,4	0,1	2048	1964	2104
			0,2	1276	1248	1780
			0,3	913	1174	1780
			0,4	710	1174	1780
			0,5	602	1174	1780
П	10	1	0,06	1586	1522	1598
			0,12	909	892	1528
			0,18	631	708	1528
			0,24	489	708	1528
			0,3	412	708	1528

На рисунке 5 представлены полученные зависимости, аппроксимированные следующим выражением:

$$A \cdot \ln^2(x) + B \cdot \ln(x) + C, \quad (6)$$

где: А, В, С – константы; x – количество разлившейся нефти, т. Полученная нелинейная зависимость аппроксимирует результаты моделирования с коэффициентом детерминации 0,99.

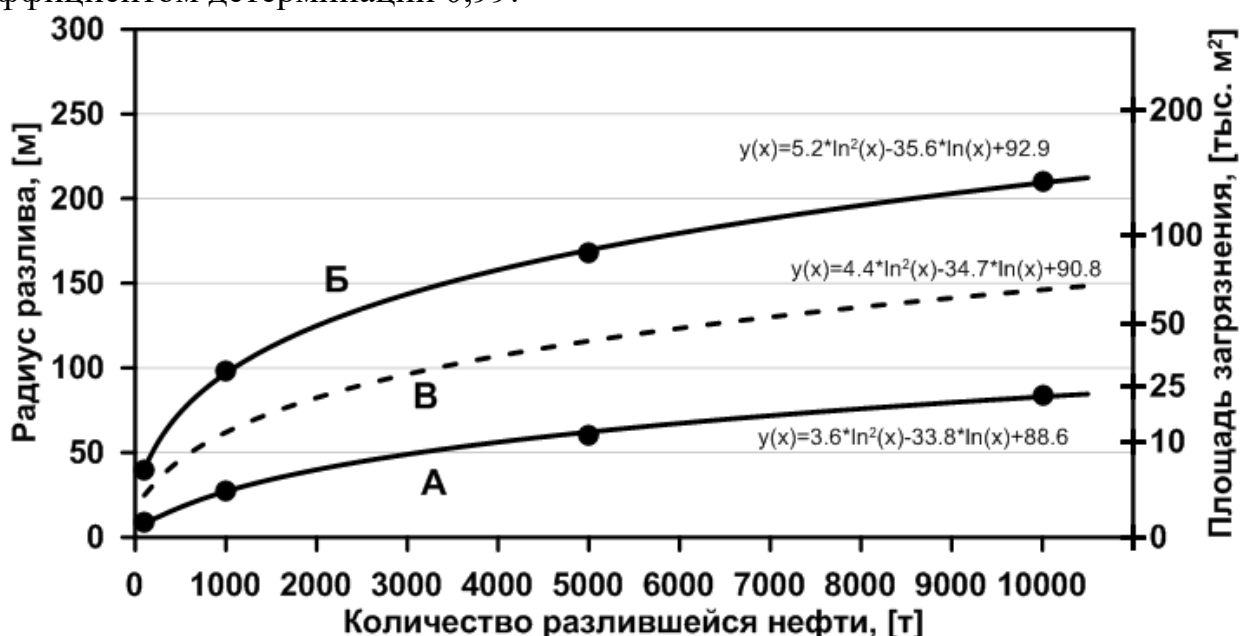


Рисунок 5 – График зависимости радиуса разлива от количества пролившейся нефти (А, Б – результаты расчетов для грунтов с максимальной и минимальной впитывающей способностью, соответственно; В – кривая построенная по средним значениям первых двух случаев).

Согласно полученным результатам разлив 10000 т нефти за 24 ч. может создать загрязнение площадью от 22 до 139 тыс. м². Такие большие различия между верхней и нижней границей, позволяют сделать вывод о том, что нефтеемкость грунта вносит наиболее значимый вклад в пространственные масштабы разливов.

В пятой главе рассмотрены возможности применения разработанной модели на практике. В первом параграфе рассмотрен вопрос о прогнозировании пространственно-временных масштабов аварийного разлива нефти на приливной осушке, с последующим смывом нефтяного пятна приливной волной. Данный метод основан на синтезе двух математических моделей – распространения нефти на поверхности суши, разработанной в рамках данного диссертационного исследования, и модели диффузии примесей, разработанной в Государственном океанографическом институте (ГОИН) для расчета рассеивания взвесей при операциях дампинга грунта.

В рамках решения данной задачи был проведен натурный эксперимент, имитирующий разлив нефти. С целью выбора места его проведения, были выполнены исследования на р. Северная Двина, в рамках экспедиционной деятельности Северо-Западного Отделения ИО РАН. Подходящих приливных осушек на ней найти не удалось, ввиду относительно небольшой величины приливов и большого количества растительности. Поэтому, для эксперимента была выбрана устьевая область реки Кянда в Онежском заливе Белого моря. Величина прилива в устье этой реки составляет 2-3 м, благодаря этому образуются достаточно обширные приливные осушки с илистыми, илесто-глинистыми и песчаными отложениями. Исходя из этого, было выбрано наиболее ровное место на песчаной осушке, с отсутствующей растительностью на устьевом взморье реки Кянда, в точке с координатами 64°16,637' с. ш. 37°58,458' в. д.

Для того чтобы исключить реальный вред природной среде от эксперимента, вместо нефти была использована схожая по своим характеристикам, и менее токсичная жидкость – растительное масло. Его плотность составила 920 кг/м³ и вязкостью 72,7 сСт (по ГОСТ Р 55475-2013), что по плотности соответствует легким нефтям и бензину. В ходе проведения эксперимента было разлито 10 литров растительного масла за 6 минут 30 секунд, исходя из этого, расход источника равен $2,56 \times 10^{-5}$ м³/с. Общее время наблюдения составило 2 часа 20 минут. В таблице 2 представлены результаты этого эксперимента, а также модельные расчеты по нему для фазы отлива.

Таблица 2 – Результаты расчета разливов флюида объемами 10 и 20 литров на обезвоженном участке

Эксперимент	Объем разлившегося флюида, л	Площадь разлива спустя		
		10 минут, S ₁ , м ²	30 минут, S ₂ , м ²	2 часа, S ₃ , м ²
Натурный	10	2,3	5	5
Вычислительный	10	2,7	3,8	4,7
	20	4,3	6,4	8,6
Отклонение результатов вычислительного эксперимента от натурального	10	+17,4%	-24%	-6%

Как видно из таблицы, различия между результатами модельного расчета и эксперимента имеют место, однако их можно считать незначительными. Они могут быть объяснены следующими фактами. Вода с приливной осушки уходит медленно и при её смешивании с маслом образуется эмульсия, которая может увеличить дальность растекания пятна. Помимо этого, в ходе эксперимента образовался микроручеёк, и часть масла вместе с ним переместилась на расстояние порядка 5 метров. Эти явления в модели можно не учитывать, так как их вклад, при разливах больших объемов нефти будет незначительным.

В таблице 3 представлены результаты моделирования аварийного разлива нефти на фазе прилива. В условиях приливной осушки реки Кянда Белого моря, нефтяное пятно при прохождении приливной волны и впоследствии перенесется на расстояние 1-1,3 км. Здесь необходимо подчеркнуть, что выполненный расчет поведения пятна аварийной нефти является «оценкой сверху», не обращая внимание на её «потери» (на процессы самоочищения) за счет действия различных факторов, таких как меры по ликвидации разливов, испарение, биodeградация, аккумуляция загрязнителей галофитной растительностью и другие.

Таблица 3 – Характеристика параметров рассеивания пятна при загрязнении бензином воды в устье р. Кянды в фазу прилива

Объем разлива	Параметр	Сценарии разлива бензина	
		На нижней границе приливной осушки	На середине приливной осушки
10 литров	Дальность переноса пятна, $L_{пр}$, м	1043	1361
	Макс. площадь дна над которым проходит загрязненная вода, $S_{пр}$, m^2	48080	61615
	Загрязненный объем воды, $W_{пр}$, m^3	96160	61615
20 литров	Дальность переноса пятна, $L_{пр}$, м	1451	1840
	Макс. площадь дна над которым проходила загрязненная вода, $S_{пр}$, m^2	67582	115319
	Загрязненный объем воды, $W_{пр}$, m^3	135164	115319

Загрязненный объем воды рассчитывался исходя из площади дна, над которым проходит нефтяное пятно, и максимальной величины (толщину водного слоя) прилива. Для данного объекта, в случае разлива на нижней границе приливной осушки, она составляет 2 м, на середине – 1 м.

Во втором параграфе рассмотрен вопрос районирования территорий Заполярной тундры по степени негативного воздействия разливов нефти на природную среду. Разработанный метод основан на гидродинамической модели разливов нефти на поверхности суши и экспертных технологиях, заключающихся в определении влияющих факторов, их весовых коэффициентов и расчета суммарного показателя.

При оценке потенциальной опасности разлива нефти необходимо учитывать такие важные факторы как уклон поверхности и наличие водных объектов вблизи потенциального источника разлива. Их включение в гидродинамическую модель представляет существенные трудности, связанные с решением дифференциальных

уравнений. Поэтому в данном диссертационном исследовании эта задача была решена при помощи экспертных оценок (технологий), заключающихся (Коробов, 2008) в определении влияющих факторов, присвоении им весовых коэффициентов, и последующим расчетом интегрального показателя экологической опасности потенциального загрязнения.

Территория НАО была поделена на квадраты со стороной 30 км, каждому из них соответствовали значения прогнозируемой площади загрязнения, средний уклон поверхности, распространенность рек и озер. Весовые коэффициенты для этих показателей, и сам суммарный показатель степени негативного воздействия разливов нефти на природную среду рассчитывается по следующей формуле:

$$a_j = \sum_{i=1}^n k_i p_j^i; \quad k_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^4 n_i}, \quad (7)$$

где: a_j – суммарный показатель опасности в квадрате с номером j , баллы; k_i – весовой коэффициент фактора под номером i ; p_j^i – нормированное значение показателя фактора с номером i в квадрате с номером j , баллы; $i=1 \dots n$ – число факторов; $j=1 \dots m$ – число квадратов сетки; n_i – порядковый номер фактора, начиная с конца ($n_4 = 1, n_1 = 4$). Полученные по этой формуле значения весовых коэффициентов равны: 0,4; 0,3; 0,2; 0,1 для прогнозируемой площади загрязнения, средний уклон поверхности, распространенность рек и озер, соответственно.

Показатель прогнозируемой площади загрязнения вычисляется, используя разработанную гидродинамическую модель, для её расчетов необходимо присвоить каждому типу почв значения таких свойств как: проницаемость, максимальная глубина проникновения нефти, максимальная и минимальная нефтеемкость. Данные свойства, главным образом зависят от типа почв. С точки зрения оценки ущерба от нефтяных разливов важен только верхний слой почв толщиной до 30-50 см. Во многих тундровых типах почв данный слой представляют торф различной степени разложения и глеевый горизонт. Так как последний имеет низкую проницаемость, он служит барьером для проникновения нефти вглубь. Исходя из этого различные типы почв были сведены в 8 групп. В каждом квадрате сетки, исходя из Национального атласа почв РФ были определены от одного до трех преобладающих типов почв, принадлежащих одной из восьми сформированных групп. Каждому из них был присвоен коэффициент значимости (1/3, 1/2, 2/3, 1) исходя из занимаемой доли площади внутри квадрата, что необходимо для дальнейшего расчета средневзвешенного показателя прогнозируемой площади разлива нефти в каждом квадрате.

Чтобы избежать влияния характеристик источника на показатель воздействия на окружающую среду, результаты моделирования были усреднены по двум сценариям разливов нефти, отличающимся по размеру прорыва в нефтепроводе – 1,4 % и 100 % от его площади сечения, и времени истечения – 12 ч и 10 мин, соответственно. Оба этих сценария соответствуют разливу 130 м³ нефти, что с учетом средней плотности нефтей, соответствует 108 т. Данный объем принят, как один из наиболее вероятных сценариев разливов нефти в данном регионе, с учетом наиболее распространённого диаметра нефтепроводов и средних скоростей прокачки по ним. Помимо этого, результаты расчетов для каждой группы почв были усреднены ещё по двум сценариям – с минимальным и максимальным показателями нефтеемкости, с

целью избежать влияния такого изменчивого показателя как влажность. Исходя из этого, а также характеристик нефтей, добываемых в данном регионе, были проведены расчеты на разработанной гидродинамической модели по 4 сценариям для каждой из 8 групп почв. Их используемые в расчетах характеристики и полученные усредненные результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики групп почв и результаты расчетов модели при разливе 108 т нефти, усредненные по 4 сценариям для каждой группы почв

Шифр	Типы почв	$k_0, Д$	$h_{пр}, м$	v_{min}	v_{max}	$S, м^2$	$V_{ф}, \%$	$h, см$
А	Пойменные заболоченные и кислые	1	0.05	0.05	0.15	2401	9.3	4.9
ГПР	Арктические и каменные многоугольники; горные примитивные	1	0.1	0.05	0.3	2337	31.0	3.8
ГТТ	Тундровые глеевые торфянистые, торфяные и торфянисто-перегнойные; тундровые поверхностно-глеевые	5	0.05	0.05	0.3	2393	16.2	4.5
ГТП	Арктотундровые перегнойно-глеевые, слабogleенные и гумусные	5	0.1	0.1	0.3	2328	35.6	3.5
ПБТ	Подбуры тундровые	5	0.2	0.1	0.4	1988	62.6	2.2
ПГТ	Торфяно- и торфянисто-подзолисто-глеевые; глее-подзолистые; подзолы глеевые торфянистые и торфяные	7.5	0.2	0.1	0.4	1942	61.8	2.3
ПОМГ	Подзолы	5	0.1	0.1	0.4	2255	42.2	3.2
ТП	Торфяные болотные; торфянисто- и торфяно-глеевые болотные	10	0.3	0.1	0.3	1832	70.8	1.9

Примечание: $k_0Д$ – проницаемость; $h_{пр}$ – максимальная глубина проникновения нефти в грунт, м; v_{min} , v_{max} – минимальная и максимальная нефтеемкость грунта; S – максимальная площадь загрязнения за 24 часа, $м^2$; $V_{ф}$ – объем нефти, впитавшейся в почву за 24 часа, %; h – средняя толщина нефтяной пленки, по прошествии 24 часов, см.

Площадь загрязнения, по прошествии 24 часов после начала разлива, варьировалась от 1800 до 2400 метров квадратных, что соответствует кругу с диаметром от 48 до 55 метров, соответственно. Средняя толщина нефтяной пленки составляет от 2 до 5 см, что согласуется с существующим методикам расчета площади загрязнения (Методика определения ущерба..., 1996; Методическое руководство по оценке степени риска аварий..., 1999), где этот показатель используется в качестве исходных для расчета данных.

Полученные значения прогнозируемой площади загрязнения были присвоены каждому квадрату, как средневзвешенное значение в соответствии с занимаемой различными типами почв доли ячейки сетки. На основе этого получена схема распределения показателя прогнозируемой площади загрязнения при разливе 108 т нефти (рис. 6).

Рельеф местности при разливах нефти имеет важную роль, так как характеризует места скопления нефти и может увеличить площадь потенциального загрязнения. В данной работе в качестве его показателя использован средний уклон поверхности, рассчитанный исходя из высотных данных – в каждом квадрате были проведены диагонали, высоты на которых были взяты с разрешением 500 м, после чего рассчитан средний уклон поверхности исходя из 80-85 точек с высотными

данными для каждого квадрата. Данный показатель является производным от карты рельефа местности и необходим, чтобы адаптировать данные о нём к имеющейся расчетной сетке.

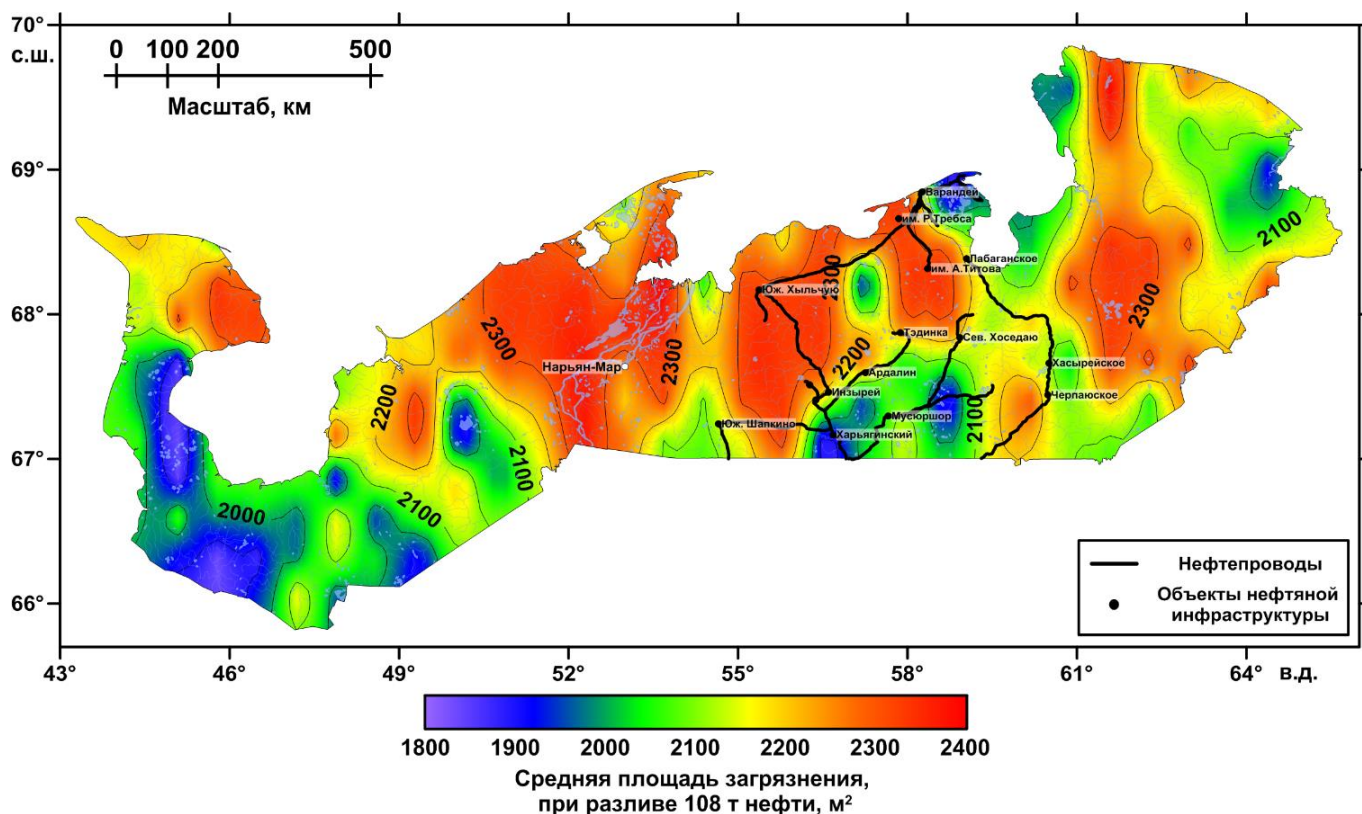


Рисунок 6 – Схема распределения показателя средней площади загрязнения при разливе 108 т нефти в Ненецком АО.

Для НАО характерна развитая гидрографическая сеть, которая содержит большое количество рек и озер, крупнейшие из которых – р. Печора и оз. Голодная губа. С точки зрения потенциального ущерба природной среде, наличие водоемов является показателем его увеличения. Так, при попадании нефти в реку, загрязнение может распространиться на существенно большее расстояние, тогда как её попадание в озеро, также увеличивает наносимый окружающей среде ущерб, но в меньшей степени, ввиду меньшего расхода воды, или его полного отсутствия. По этой причине реки и озера необходимо рассматривать как два отдельных фактора.

В данной работе были рассчитаны показатели распространенности рек и озер, выражающиеся в отношении площадей водоёмов к площади территории, на которой они расположены. Для малых рек и ручьев площадь в каждом квадрате была рассчитана исходя из их суммарной протяженности и показателя средней ширины. Поскольку ширина малых рек изменяется в значительном диапазоне (Чалов Р.С., 2016) для определенности эта характеристика принята равной 10 м. Для средних, крупных рек и производился непосредственный обсчет их площадей. Расчеты выполнены при помощи ГИС-технологий на сетке с размером ячейки 30 на 30 км. Для озер использовался показатель густоты – отношение их суммарной площади к площади ячейки сетки, выраженное в процентах. Попадание нефти в озеро увеличит нанесенный вред природной среде. Несмотря на то, что плотность нефти меньше плотности воды, при испарении её легких фракций, она может осаждаться.

Антропогенные загрязнители, в том числе и нефть, имеют свойства аккумулироваться в донных отложениях озер (Субетто Д.А., 2017), и в определенных случаях могут служить вторичными источниками загрязнения природной среды.

На рисунке 7 представлены результаты районирования территории НАО по степени воздействия разливов нефти на природную среду, в виде карты-схемы с нанесенными на неё нефтепроводами и крупными объектами нефтяной инфраструктуры. Показатель выражен при помощи вербальной пятиступенчатой шкалы с уровнями воздействия от очень низкого до очень высокого.

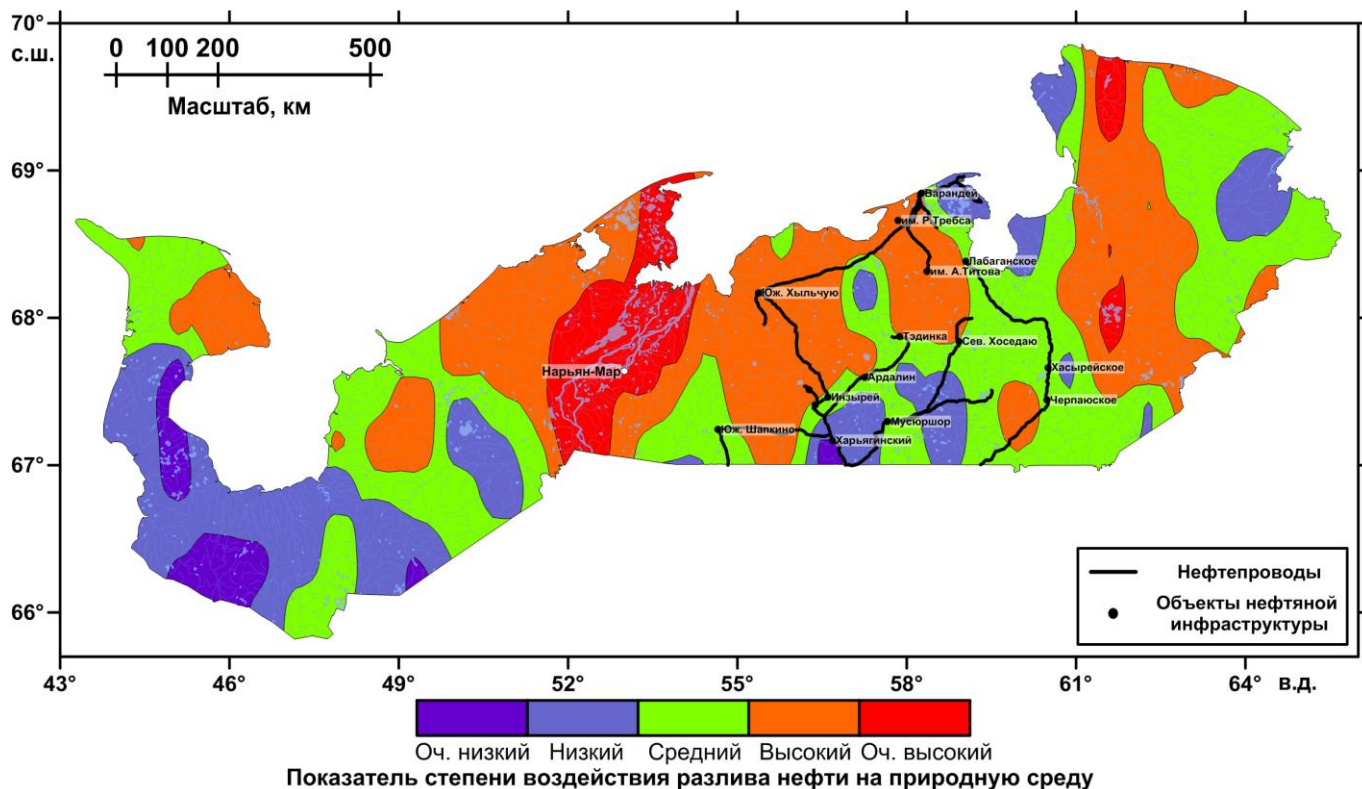


Рисунок 7 – Районирование территории НАО по показателю степени негативного воздействия разливов нефти на природную среду

Очень низкому уровню воздействия соответствуют территории со следующими комбинациями факторов: низкая прогнозируемая площадь загрязнения, отсутствие средних и крупных рек, небольшая суммарная площадь озер или их отсутствие. Очень высокому – максимальная прогнозируемая площадь загрязнения, наличие крупных рек или высокая суммарная площадь озер. Высокий уровень воздействия имеют территории, с теми же факторами, что и очень высокого уровня, но с меньшими показателями, либо с отсутствующими средними и крупными водоёмами, но с высокими прогнозируемой площадью и уклоном поверхности.

Наиболее подверженные воздействию участки приходятся на территории вблизи реки Печора и некоторых крупных озер в восточной части НАО, а наименее – в его юго-западной части. Тогда, как основная часть нефтяной инфраструктуры расположена к востоку от реки Печора и столицы региона г. Нарьян-Мар, в этой зоне встречаются участки как с низким уровнем воздействия, так и с высоким. Наиболее крупный нефтеперевалочный пункт, Варандейский резервуарный парк, находится на границе среднего и высокого уровня воздействия.

Исходя из этих результатов, можно сделать вывод о необходимом месторасположении средств ликвидации разливов нефти. Так, в районе посёлков Харьягинский и Ардалин их достаточно располагать только на крупных объектах, тогда как на протяжении нефтепровода Южное Хыльчую – Варандей необходимо размещение дополнительных пунктов.

Рассмотренный метод применим не только к крупным площадным объектам, но и к линейным, таким как нефтепроводы и другие транспортные магистрали. А также и к локальным объектам нефтяной инфраструктуры, таким как месторождения, резервуары хранения, станции перекачки и другие. Детальность применяемого метода зависит от заданной расчётной сетки. В **третьем параграфе** этот метод применен для районирования трассы нефтепровода «Южное Хыльчую – Варандей» в Ненецком АО. Общая протяженность рассматриваемого нефтепровода составляет 153 км, он проложен по территории с пятью различными типами почв, встречающихся в тундре. Для проведения расчетов нефтепровод поделен на 306 участков, протяженность 500 м каждый.

Основным отличиями метода, в данном случае является расчет показателей факторов, средняя площадь заменяется на средний радиус разлива, распространённость и густота водных объектов – их наличием вблизи 50 метров от нефтепровода или его пересечением. Выделено две категории водных объектов: озера; реки и ручьи. По данным критериям было принято во внимание 39 озер, 20 пересечений ручьев и рек. Средний уклон поверхности, рассчитывается по линии нефтепровода с разрешением 500 м. Для данного нефтепровода максимальный уклон вдоль трассы составил 6,2 %, средний уклон по всей трассе – 1.0 %. Для 5 групп почв встречающийся на трассе нефтепровода минимальный средний радиус при разливе 108 т составил 23,9 м, максимальный – 26,8 м.

На рисунке 8 отражены результаты районирования – схема распределения значений интегрального показателя по трассе нефтепровода и их вербальная интерпретация. Максимальным значениям показателя опасности соответствуют участки нефтепровода с наибольшим числом водных объектов, что укладывается в общую картину понимания наносимого природной среде урона, так как масштабы аварии при попадании в них нефти могут существенно увеличиться. Минимальные значения индекса соответствуют участкам, на которых отсутствуют водные объекты, минимальный уклон местности и наименьшая прогнозируемая площадь загрязнения. На рассматриваемом нефтепроводе участки с очень низким и очень высоким суммарным баллом опасности отсутствуют. Единичные участки с высоким уровнем опасности присутствуют, и связаны в большей мере с местами пересечения трассы нефтепровода с водными объектами. На юго-западной части нефтепровода преобладает средний уровень опасности. На северо-восточной – низкий, за исключением ближайших к п. Варандей 20 км нефтепровода, где ввиду большого количества озер, малых рек и ручьев, уровень повышается до среднего.

По результатам применения предлагаемого метода для нефтепровода «Южное Хыльчую – Варандей», расположенного в Ненецком автономном округе, и принимая во внимание слабо развитую транспортную инфраструктуру региона, можно сделать вывод о необходимости размещения средств ликвидации не только в конечном и

начальном пункте нефтепровода, но и на его наиболее уязвимой части – первых 100 км от пункта Южное Хыльчюю.

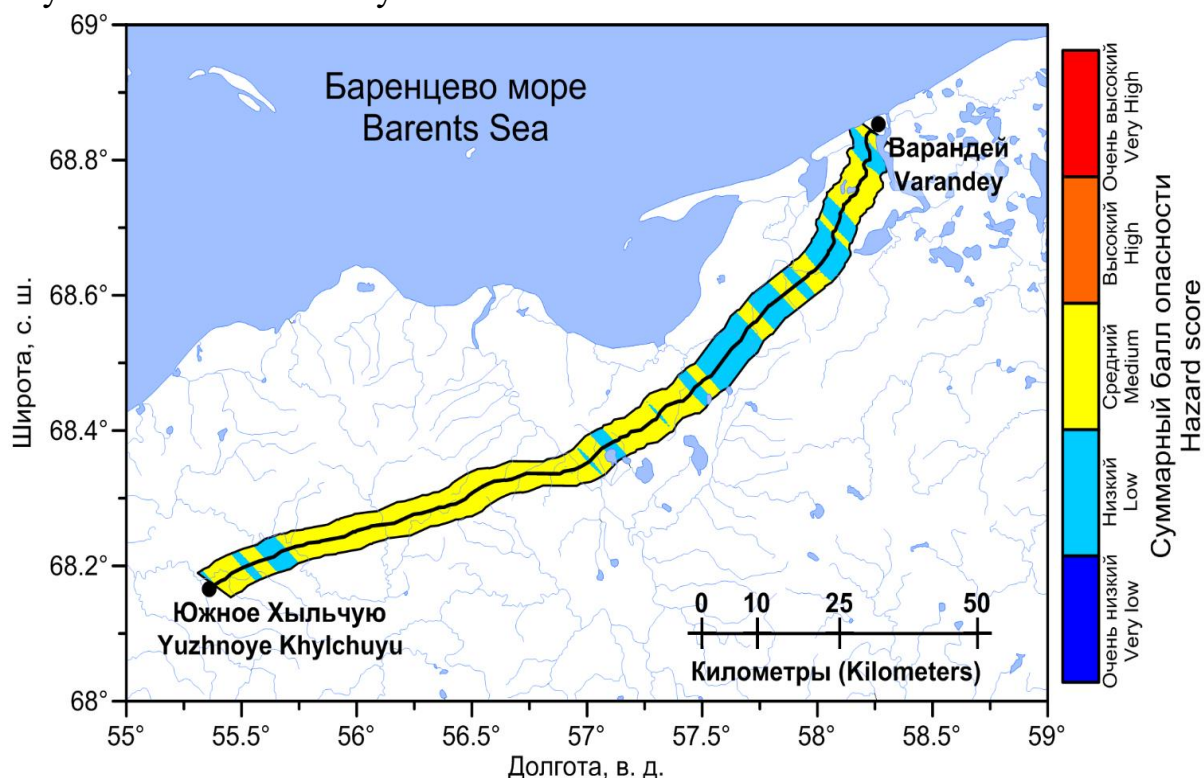


Рисунок 8 – Схема распределения балла опасности для трассы нефтепровода «Южное Хыльчюю – Варандей». Масштаб ширины трассы нефтепровода на схеме увеличен, её реальные размеры составляют 100 м.

В **заключении** представлены выводы и основные результаты диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1) В работе выполнен обзор природных условий Заполярной тундры, выявлены наиболее важные характеристики природной среды, с точки зрения их влияния на процессы растекания нефти. Исходя из сравнительного анализа существующих методик сделан вывод о необходимости учета при оценке масштабов нефтяного загрязнения на суше трех основных физико-химических процессов: растекание по поверхности; фильтрация в грунт и испарение в атмосферу.

2) Для оценки пространственно-временных масштабов последствий разлива нефти на поверхности Заполярной тундры разработана нестационарная гидродинамическая модель, позволяющая выполнить одновременный расчет растекания нефти на основе гидродинамического уравнения (уравнение диффузии), фильтрации (уравнения Дарси) и испарения (эмпирическая зависимость). Задача учета таких важных параметров как уклон поверхности и наличие водоёмов вблизи источника загрязнения решена при помощи экспертных оценок (технологий), заключающихся в определении влияющих факторов, присвоении им весовых коэффициентов, и последующим расчетом интегрального показателя опасности потенциального загрязнения. Для учёта процесса испарения проведен лабораторный эксперимент, по результатам которого получена эмпирическая зависимость скорости испарения от времени, для конкретного состава нефти.

3) По результатам численных экспериментов определено, что разлив 100 т нефти при различных условиях может загрязнить от 412 до 4560 м² поверхности суши. Получена зависимость площади нефтяного загрязнения от объема разлившейся нефти, для грунтов с различной нефтеемкостью. Так, согласно результатам расчетов, разлив 10 тыс. т нефти может загрязнить площадь от 22 до 139 тыс. м².

4) В работе предложен метод оценки распространения нефтяного загрязнения на приливных осушках в устьевых областях Арктических морей, путем синтеза двух моделей: разработанной в работе модели растекания на поверхности суши (для фазы отлива) и модели диффузии примесей в воде (для фазы прилива), который апробирован в зоне осушки реки Кянда Белого моря.

5) На основе полученных оценок пространственно-временных масштабов загрязнения с учетом площади разлива, среднего уклона поверхности, распространённости водоемов и при помощи экспертных технологий, выполнено районирование территории Ненецкого автономного округа, с использованием удобной для восприятия пятиступенчатой шкалы ранжирования опасности. Принципы районирования позволяет выявить зоны наиболее подверженные негативному воздействию в случае аварийных разливов нефти и принимать необходимые решения для размещения мест базирования средств ликвидации разливов, а также самих объектов уже на этапе выбора и проектирования трассы нефтепровода. Так, в районе посёлков Харьягинский и Ардалин их достаточно располагать только на крупных объектах, тогда как на протяжении нефтепровода Южное Хыльчую - Варандей необходимо размещение средств ликвидации не только в конечном и начальном пункте нефтепровода, но и на его наиболее уязвимой части – первых 100 км от пункта Южное Хыльчую.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих работах:

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ по специальности 25.00.36:

1 **Лохов А.С.**, Мискевич И.В. Моделирование поведения разлитой нефти в зонах приливной осушки морей западного сектора Российской Арктики // *Проблемы региональной экологии* – № 1 – 2019 – С. 56-64.

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ по другим специальностям:

2 **Лохов А.С.**, Районирование территории Ненецкого автономного округа по степени воздействия потенциального разлива нефти на природную среду // *Естественные и технические науки*, 2020, № 8(146), с. 116-122.

3 Губайдуллин М.Г., **Лохов А.С.**, Коробов В.Б., Тарасова Г.М. Экспериментальное исследование испаряемости нефти с целью моделирования загрязнения природной среды при разливах на земную поверхность в Арктике // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2016. Вып. 4 (106). - С. 137-145.

4 Павленко В.И., Муангу Ж., Коробов В. Б., **Лохов А.С.** Актуальные проблемы предотвращения, ликвидации разливов нефти в Арктике и методы оценки экологического ущерба прибрежным территориям // *Арктика: Экология и экономика* – № 3(19) – 2015 – С. 4-11.

В том числе публикации в журналах, входящих в базы данных WoS и/или Scopus:

5 **Лохов А.С.**, Губайдуллин М.Г., Коробов В.Б., Тутьгин А.Г. Географо-экологическое районирование трассы нефтепровода по степени опасности воздействия на окружающую среду при аварийных разливах нефти в Арктике. // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 4. С.45-50. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-4-045-050

6 Лещёв А.В., Хоменко Г.Д., Коробов В.Б., **Лохов А.С.**, Чульцова А.Л., Ружникова Н.Н., Махнович Н.М., Белоруков С.К., Яковлев А.Е., Ефремова О.П., Муангу Ж.Э.Р. Экспедиционные работы в устьевой области реки Северной Двины в марте 2014 г. – *Океанология*, 2015, Т. 55, № 2. – С. 348-350.

Публикации в других изданиях:

7 **Лохов А.С.**, Губайдуллин М.Г. Прогнозирование потенциального ущерба природной среде территории Ненецкого автономного округа от разливов нефти // Глобальные проблемы Арктики и Антарктики [электронный ресурс]: сборник науч. материалов Всерос. конф. с междунар. участием, посвящен. 90-летию со дня рождения акад. Николая Павловича Лавёрова / отв. ред. акад. РАН А. О. Глико, акад. РАН А. А. Барях, чл.-корр. РАН К. В. Лобанов, чл.-корр. РАН И. Н. Болотов. – Архангельск, 2020. – С. 858-862.

8 **Лохов А.С.** Расчет площади аварийного разлива нефти на суше для некоторых типов грунтов. // Проблемы освоения нефтегазовых месторождений приарктических территорий России: материалы научной конференции студентов и аспирантов высшей школы энергетики, нефти и газа (апрель 2019 г.) – Архангельск: САФУ, 2019. – Вып. 2. – С. 66-70.

9 **Лохов А.С.**, Мискевич И.В. Моделирование аварийных разливов нефти в зонах приливных осушек Белого моря // Геология морей и океанов: Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. – М.: ИО РАН, 2019. – С. 179-183.

10 **Лохов А.С.**, Математическое моделирование растекания нефти на поверхности суши // Развитие Северо-Арктического региона: проблемы и решения: материалы конференции 21-25 марта 2016 г. – Архангельск: САФУ, 2016. – С. 451-454.

11 **Лохов А.С.**, Муангу Ж.Э.Р. Оценка масштабов загрязнения территорий путем математического моделирования // Перспективы и проблемы освоения месторождений нефти и газа в прибрежно-шельфовой зоне Арктики России: материалы Международной научно-практической конференции (10-11 июня 2015 г.) / отв. ред. проф. М.Г. Губайдуллин; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. – Архангельск: САФУ, 2015. – С. 84-88.

12 Коробов В.Б., Середкин К.А., **Лохов А.С.**, Нецветаева О.П., Кошелева В.П. Проблемы интерполяции пространственно-неоднородных данных на нерегулярных сетках в Белом море. // Геология морей и океанов: Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. – М: ГЕОС, 2015. – С. 203-205.

13 Мискевич И.В., Белоруков С.К., **Лохов А.С.** Оценка масштабов осолонения устья реки Кянда в Онежском заливе Белого моря // Труды Архангельского центра Русского географического общества: Сборник научных статей – Архангельск, 2015, Выпуск 3. – С. 252-256