

УДК 504.054

Актуальные проблемы предотвращения, ликвидации разливов нефти в Арктике и методы оценки экологического ущерба прибрежным территориям

В. И. Павленко¹, доктор экономических наук
Архангельский научный центр Уральского отделения РАН

Ж. Муангу², кандидат физико-математических наук
Северо-западное отделение ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Архангельск

В. Б. Коробов³, доктор географических наук
Архангельский научный центр Уральского отделения РАН,
Северо-западное отделение ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Архангельск

А. С. Лохов⁴
Северо-Западное отделение ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Архангельск

Рассмотрены специфические особенности изменений природной среды Арктики в связи с перспективами масштабного освоения углеводородного сырья шельфа и прибрежных районов, нормативная база приарктических государств по оценке состояния окружающей среды и методы расчета ущерба от разливов нефти и нефтепродуктов.

Ключевые слова: природная среда Арктики, разливы нефти и нефтепродуктов, растекание и трансформация нефти, оценка ущерба, моделирование.

Актуальные проблемы предотвращения, ликвидации разливов нефти в Арктике

Широко известно, что по совокупности показателей токсичности и масштабам вовлечения в хозяйственную деятельность нефть является одним из наиболее существенных факторов экологического риска для биоты вообще, а арктической особенно — в силу особой уязвимости природной среды к техногенному и антропогенному загрязнению. В составе нефти содержатся мутагены, канцерогены, ингибиторы биосинтеза и другие токсиканты.

Разливы, как показывает практика, могут произойти на любом из этапов: добычи, хранения, транспортировки нефти или нефтепродуктов.

Среди потенциальных источников — фонтанирование скважины во время разведки или добычи, выбросы и утечки из трубопроводов, резервуаров для хранения нефтепродуктов (на суше, разведочных, добывающих платформах), а также в результате аварий с участием автомобильного, железнодорожного, речного или морского транспорта.

Предотвращение и ликвидация разливов нефти в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ), оценка угроз и ущерба прибрежным территориям предполагают использование новейших технологий и оборудования, разработки системы математических моделей, предполагающей численное решение многофакторной и нелинейной задачи.

Наибольшую сложность в преодолении названных проблем вызывает не материковая часть АЗРФ, а зона шельфа и прибрежные территории [1].

По сравнению с водами других морей Мирового океана арктические морские воды имеют в среднем

¹ e-mail: chairman.arhsc@mail.ru.

² e-mail: szoioran@mail.ru.

³ e-mail: szoioran@mail.ru.

⁴ e-mail: szoioran@mail.ru.



Рис. 1. Остров Св. Матвея (штат Аляска, США). Тюленья бухта, заполненная тающим морским льдом в июне

более низкие значения температуры и солёности. Типичные зимние условия в Арктике — низкие температуры, образование и движение морских льдов, наличие экстремальных и непредсказуемых погодных условий, продолжительные периоды темноты (полярная ночь). Любое из перечисленных условий не только является фактором повышения рисков значительных аварийных разливов нефти, но и снижает эффективность мероприятий по их ликвидации [2].

Характерной чертой арктических морей является наличие припайного льда, который в ряде случаев может предотвращать выброс разлитой нефти на берег и соответственно снижать ущерб окружающей среде. В то же время морской лёд препятствует доступу к зоне разлива нефти. Это важно, так как прибрежная зона наиболее биологически продуктивна по сравнению с районами открытого моря (пример — рис. 1).



Рис. 2. Нефтяной танкер «Seabulk Pride» на мели к северу от Никиски в заливе Кука (штат Аляска, США)

Суровая природа Арктики создает сложные условия навигации, которые оказывают большое влияние на безопасность производственной деятельности, связанной с добычей и транспортировкой углеводородного сырья. Так, в феврале 2006 г. у берегов Аляски в порту города Никиски село на мель танкер «Seabulk Pride» с 20 тыс. т нефти и нефтепродуктов на борту. Причиной послужило то, что в момент заправки нефти в танкер врезалась плавающая льдина. В результате произошел разрыв шлангов, по которым нефть подавалась на борт. Льдина «тащила» 183-метровое судно по течению, пока оно не село на мель. При разрыве шлангов в воду и на палубу танкера попало около тонны нефти. Разлив был быстро локализован (рис. 2).

Существует несколько характеристик арктических условий окружающей среды и арктических форм жизни, которые усиливают потенциальные негативные последствия нефтяных разливов на материковой



Рис. 3. Сбор со льда разливов нефтепродуктов в Финском заливе

части и в арктических водах. На шельфе наиболее существенны две: нефть сохраняется значительно дольше, поскольку ее испарение происходит медленно или она может оказаться в ловушке во льду или подо льдом (в результате становится труднодоступной для бактериального разложения); восстановление флоры и фауны после аварии замедлено, так как многие виды имеют относительно большую продолжительность жизни и более медленный цикл смены поколений.

Недавние многочисленные исследования, опубликованные в США, показывают, что долговременные последствия нефтяных разливов, влияющих на температуру и субарктическую прибрежную среду, могут сохраняться значительно дольше первоначальных прогнозов. Например, остаточная нефть, попавшая в окружающую среду в результате аварии нефтяного танкера «Exxon Valdez», который в 1989 г. сел на мель в заливе Принца Уильяма (штат Аляска), оставалась там значительно дольше, чем прогнозировалось. В 2005 г. было обнаружено, что нефть только слегка выветрилась в прибрежной полосе вдоль зоны нефтяного разлива.

Остаточная нефть на материковой части АЗРФ сохраняет токсичные свойства и остается биологически активной. Специалисты прогнозируют, что приповерхностная нефть может оставаться в почве на протяжении десятилетий.

В определенных случаях арктические условия могут быть и благоприятными для ликвидации нефтяных разливов. Однако в целом арктические условия снижают эффективность методов локализации и ликвидации разливов нефти и работы

соответствующего оборудования, существенно повышают экологические и экономические риски [3].

В настоящей статье предпринята попытка определения основных направлений фундаментальных научных исследований в целях локализации и ликвидации загрязнения нефтью, а также методов оценки потенциального ущерба в связи с ее добычей на шельфе и в прибрежной зоне арктических морей.

Совершенно очевидно, что каждое из арктических морей располагает специфическими региональными особенностями. Поэтому проведение исследований и последующая разработка практических рекомендаций по локализации и ликвидации нефтяных разливов с методологической точки зрения предполагают формирование соответствующих каждому конкретному региону экологических стандартов, норм и требований.

Для целей предотвращения и ликвидации нефтяных разливов, отработки соответствующих методологии, методов и технологий в качестве пилотного проекта интересно Баренцево море ввиду ряда обстоятельств:

- Оно наиболее изучено с точки зрения обеспеченности углеводородами по сравнению с другими морями Арктики. Открытие Штокмановского и других месторождений фактически предопределило начало их интенсивного исследования и необходимость разработки методов ликвидации аварийных разливов нефти во льдах, а также оценок потенциального ущерба в приоритетном порядке.
- По сравнению с другими арктическими морями биологические ресурсы Баренцева моря достаточно хорошо изучены. Прибрежные воды в высокой

степени обеспечены запасами рыбы и морепродуктов, через него проходят миграционные пути лосося, палтуса, трески, угря, печорской семги и других ценных промысловых рыб, там располагаются лежбища морского зверя.

- Острова и архипелаги, дельты рек, огромные территории водно-болотных угодий, которые обладают идеальными условиями для гнездования и линьки многих видов птиц в летнее время (в том числе большого количества «краснокнижных» видов), абсолютно беззащитны перед нефтяной угрозой не только с моря, но и с прибрежных территорий, в пределах которых ведется масштабная добыча.
- Необходимо учитывать, что нефтяные разливы на земной поверхности интенсивно поглощаются грунтами и на долгие годы становятся источником вторичного загрязнения природной среды. В весенне-летний период при таянии снежного покрова образующиеся на местах аварий загрязненные грунтовые воды непосредственно или через речной сток попадают в море, где течением и волнением распространяются на значительную акваторию. Часть загрязненных нефтью и нефтепродуктами вод может попасть в море и через посредство подземных вод, если разгрузка водоносных пластов происходит на морском дне или на впадающих в море реках.
- Баренцево море характеризуется сильными штормами и ветрами, туманами, плохой видимостью, «кочующими» ледяными полями, предельно низкими температурами. Поэтому вероятность возникновения аварийных ситуаций весьма велика.
- Нефтегазодобыча и транспортировка углеводородов в Баренцевом море могут стать важнейшими конкурентными преимуществами биоресурсным отраслям, составляющим основу природопользования в регионе.

Нефть, нефтепродукты, промысловые воды, углеводородный газ, отходы бурения поступают в окружающую среду из скважин, мест хранения, трубопроводов. Уровень техногенного воздействия на компоненты природной среды обуславливается особенностями географического положения и технологией производства. Надежность технологического оборудования и соблюдение природоохранных мероприятий снижают вероятность возникновения опасных ситуаций. Но в целом необходимо признать, что техногенные геохимические потоки, формирующиеся в окружающей среде при разработке месторождений нефти, — объективный процесс, исключить который практически невозможно.

Существующие технологии ликвидации разливов нефти требуют отделения нефти ото льда, поэтому локализация нефти в ледовых условиях является достаточно сложной операцией. Как показали исследования и эксперименты, при оперативной локализации пятна эффективность операций по механическому сбору и сжиганию нефти существенно возрастает. На полевых испытаниях удавалось



Рис. 4. Сбор со льда разливов нефтепродуктов в Финском заливе

собирать 30—50% разлитой нефти, а в экспериментах по сжиганию уничтожалось до 90% объема разлива. В реальных условиях успехом считается сбор 30% разлитой нефти при среднем показателе 10—15%.

Проблематичным является сбор нефти, попадающей под ледяное покрытие (например, при разрыве морского трубопровода или после изменения ледовых условий). Возможность ликвидации этих разливов связана с задачами обнаружения подледных скоплений нефти и обеспечением безопасной работы персонала на льду, а практика ликвидации таких разливов связана со вскрытием ледяного покрова и применением традиционных методов сбора нефти. При сплоченности льда более 3 баллов образуются физические барьеры для распространения нефти, при этом она задерживается в неровностях нижней поверхности ледяного покрытия. При большой сплоченности льда (8—9 баллов) даже очень крупные разливы (более 1000 т) распространяются лишь на сотни метров от места разлива.

На рис. 3 и 4 показан процесс сбора со льда разливов нефтепродуктов в Финском заливе.

Успешность решения проблемы рационального природопользования в значительной степени определяется наличием экологических и экономически взвешенной системы нормативов, стандартов, регламентов, применение которых ограничивает нагрузку на объекты природной среды. Недостаточное развитие нормативно-правовой базы, учитывающей особенности и регламентирующей ведение хозяйственной деятельности с учетом всего комплекса природно-экологических, технологических, социальных, экономических факторов, а также несоблюдение технологических и природоохранных регламентов при проведении работ — важнейшие причины экологического неблагополучия [3].

Система экологических требований (регламентов) должна стать практической основой и одним из основных инструментов в области охраны окружающей среды, обеспечивая специалистам и лицам, принимающим решения, возможность разработки последовательных и эффективных мер защиты природы. Наряду с созданием новых природоохранных регламентов необходим пересмотр некоторых уже применяемых на практике в течение последних лет документов. Необходимость их систематизации и доработки определяется не только наличием различий, но и возросшими требованиями к охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности.

Централизованные стандарты и нормы не могут учесть региональные особенности состояния природной среды, специфику разрабатываемых месторождений, особенности производственных процессов, виды и объемы загрязнения. Проблематичным является также реальное использование излишне строгих регламентов, если разработанные к настоящему времени технологии очистки и восстановления нарушенных экосистем не всегда могут обеспечить заложенные в документах требования либо финансовые возможности предприятий не позволяют применять сверхдорогие технологии. Это влечет подрыв доверия к природоохранным регламентам, принятым «с запасом» и требующим трудноосуществимых природоохранных мер и весьма существенных ассигнований.

Существующее в нашей стране регулирование в области природопользования и экологического аудита неоднозначно и многомерно. Оно опирается на систему показателей предельно допустимых концентраций и здоровья населения (Минздрав России), на показатели жизнедеятельности флоры и фауны (Минприроды России), на вопросы контроля технологических процессов промышленного производства (Минпромторг России). Существующие регламенты разрабатывались различными ведомствами и нередко без должного научного обоснования и экспериментальной проверки.

Существуют различные методы определения нефти и нефтепродуктов в почвах и грунтах (три аттестованных методики), три разных методики по подсчету ущерба, наносимого природной среде при разливах нефти (химическом загрязнении), отходы предприятий классифицируются по четырем классам опасности Минздравом России и по пяти классам — Минприроды России.

Сложности в системе регламентации испытывает не только отечественная система природоохранных регламентов. Анализ зарубежных публикаций показывает, что и промышленно развитые страны в вопросах регламентации природоохранной деятельности и разработки механизмов защиты окружающей среды прошли сложный и нередко противоречивый путь.

На наш взгляд, в Арктике стандарты и нормативы в обязательном порядке должны быть региональными. Их показатели должны определяться для каждой конкретной акватории с учетом вида, направленности и уровня техногенного воздействия, природно-климатических условий, устойчивости экосистем и их способности переносить техногенные нагрузки, а также с учетом существующих фоновых концентраций различных загрязняющих веществ, в частности нефтепродуктов, и возможности адаптации экосистем к загрязнению.

Необходимо особо отметить стремление руководства приарктических государств, поддержанное научным сообществом, к формированию правовых, экономических, финансовых и технологических механизмов решения задач предотвращения и ликвидации разливов нефти в Арктике. Так, в 2010 г. в рамках проекта «Нефтяное загрязнение — оценка рисков и поддержка принятия решений», подготовленного Российской академией наук [3], в целях реализации в качестве программы научного комитета «Наука ради мира и безопасности» Комиссии Россия-НАТО планировалось совместно с компанией «Акваплан-нива» (Норвегия) определить и сопоставить критерии качества окружающей среды нефтегазовых регионов циркумполярных стран. И далее на этой основе разработать проект рекомендаций по оценке качества окружающей среды для восьми стран, имеющих выход к морям Северного Ледовитого океана.

Значительным совместным успехом явилось подписание в 2013 г. в Кируне (Швеция) юридически обязывающего соглашения приарктических стран о сотрудничестве в сфере готовности и реагирования на загрязнение моря нефтью в Арктике.

При проектировании нефтедобывающих объектов следует оценивать масштабы потенциального загрязнения, чтобы на основании прогнозных данных разрабатывать конкретные мероприятия по ликвидации последствий аварийных разливов. При этом сопоставление возможных последствий альтернатив освоения месторождений, строительства объектов транспортной инфраструктуры позволяет выбрать более эффективный вариант их размещения с позиций минимизации ущерба нефтяных разливов.

В прибрежной зоне арктических морей России находится множество нефтяных месторождений, функционирует большое количество объектов нефтяной транспортной инфраструктуры, число которых в связи с увеличением объемов добычи в самом ближайшем будущем планируется существенно увеличить [4].

Практика показывает, что эксплуатация как нефтепромыслов, так и транспортной системы сопровождается выбросами в природную среду значительных объемов нефти, особенно во время аварий. При этом природе наносится огромный ущерб, усугубляемый длительными сроками восстановления

арктических экосистем и большими затратами на ликвидацию последствий [5; 6].

Поэтому для проектирования таких объектов необходимо оценивать масштабы потенциального загрязнения, чтобы на основании полученных оценок можно было разработать действенные мероприятия по ликвидации последствий аварийных разливов. С другой стороны, сравнение возможных последствий для различных альтернатив освоения месторождений и особенно для объектов транспортной инфраструктуры позволяет выбрать более эффективный вариант их размещения, чтобы минимизировать последствия нефтяных разливов.

В рамках исследуемой темы в качестве наиболее интересного объекта исследований была выбрана прибрежная зона Баренцева моря. Это связано с рядом обстоятельств. Во-первых, в северной (материковой) части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции в пределах Ненецкого АО ведется масштабная добыча нефти. Во-вторых, наблюдения показали, что нефтяные разливы на земной поверхности интенсивно поглощаются грунтами и на долгие годы становятся источником вторичного загрязнения природной среды. В-третьих, в весенне-летний период при таянии снежного покрова образующиеся на местах аварий загрязненные воды непосредственно или через речной сток попадают в Баренцево море, где течением и волнением распространяются на большой акватории. Часть загрязненных нефтью и нефтепродуктами вод может попасть в море, если разгрузка водоносных пластов происходит на морском дне или впадающих в море реках.

Для получения оценок пространственно-временных масштабов загрязнения можно воспользоваться двумя подходами: методом аналогий и моделированием процессов растекания и трансформации нефтяных углеводородов в природной среде. Первый подход ограничен самой природой, которая редко повторяется, да и аварийные ситуации также весьма разнообразны. Второй подход нам представляется более перспективным, поскольку позволяет имитировать весь процесс эволюции нефтяного загрязнения, к тому же при различных сценариях аварий.

Оценить масштабы и последствия нефтяного загрязнения можно при помощи математических моделей. Это наиболее распространенный путь. В настоящее время разработано большое количество соответствующих моделей, состоящих из нескольких блоков. Однако даже в самых известных из них редко можно встретить наличие всех составляющих, позволяющих рассчитывать эволюцию нефтяного пятна на водной поверхности, суше и в местах их контакта в береговой зоне, да еще адаптированных к арктическим условиям. В большинстве своем они ориентированы на водную поверхность.

Поэтому нами была поставлена задача разработать именно «сухопутную» модель, которая помимо самостоятельного значения могла бы играть роль

определенного блока для построения математических моделей загрязнения морских и речных вод.

Математическая модель растекания нефти по земной поверхности должна учитывать следующие процессы и обстоятельства:

- физико-химические свойства нефти, от которых зависят величина испаряемости легких фракций и коэффициент вязкости;
- наклон поверхности, влияющий на скорость растекания и, следовательно, величину и форму площади загрязнения;
- свойства подстилающей поверхности — характер растительности, пористость и обводненность грунтов, от которых зависят скорость растекания и величина поглощения нефтяных углеводородов грунтами и почвами.

Естественно, что на процессы нефтяного загрязнения влияют и другие факторы, например температура воздуха, от которой зависит интенсивность испарения. Они также должны учитываться в моделях. Но перечисленные выше факторы — основополагающие.

Модель разлива нефти

Учитывать растекание и поглощение нефти грунтами можно при помощи уравнения неразрывности и закона фильтрации Дарси, замыкая систему уравнениями состояния [7; 8]. После линеаризации задача примет следующий вид:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial h}{\partial t} - \Delta h = \frac{Q}{k} \quad (1)$$

с начальными $h|_{t=0} = 0$ и граничными $k \frac{\partial h}{\partial z}|_{z=0} = \mu(x, y, t)$ условиями (Q — источник растекания). Данная модель позволяет оценить площадь и объем загрязнения грунтов при растекании нефти непосредственно на поверхности.

Входящие в модель параметры h — глубина проникновения нефти в грунт и a — коэффициент пьезопроводности можно рассчитать по формулам:

$$h = p / \rho g + z, \quad (2)$$

$$a = \frac{(1 - p_0 \beta_{жк}) k}{(\beta_{нл} + m_0 \beta_{жк}) \rho_0 g}. \quad (3)$$

В выражениях (1)—(3) t — время, с; ρ_0 — плотность нефти, кг/м³; $\beta_{жк}$ — сжимаемость нефти, Па⁻¹; μ — вязкость нефти, м²/с; m_0 — пористость грунта; $\beta_{нл}$ — сжимаемость грунта, Па⁻¹; $k = v \rho_0 g$ — коэффициент фильтрации, м/с; v — нефтеемкость грунта; $\varepsilon(x, y, t)$ — скорость фильтрации, м/с; p_0 — давление, Па; g — ускорение свободного падения, м/с²;

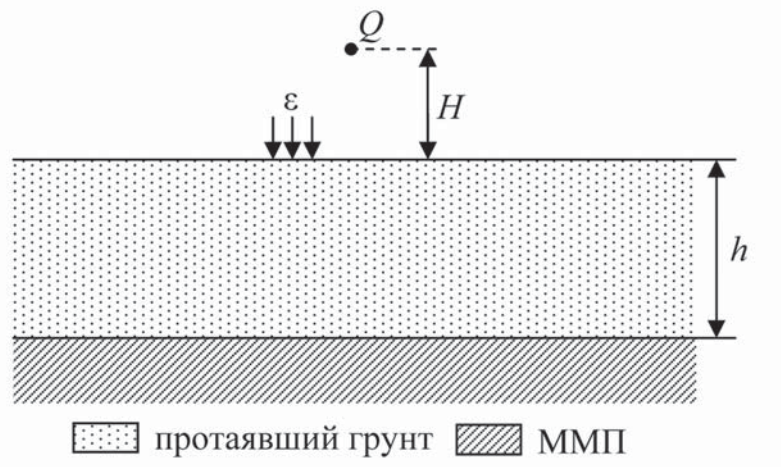


Рис. 5. Исходное расположение источника (ММП – многолетние мерзлые породы)

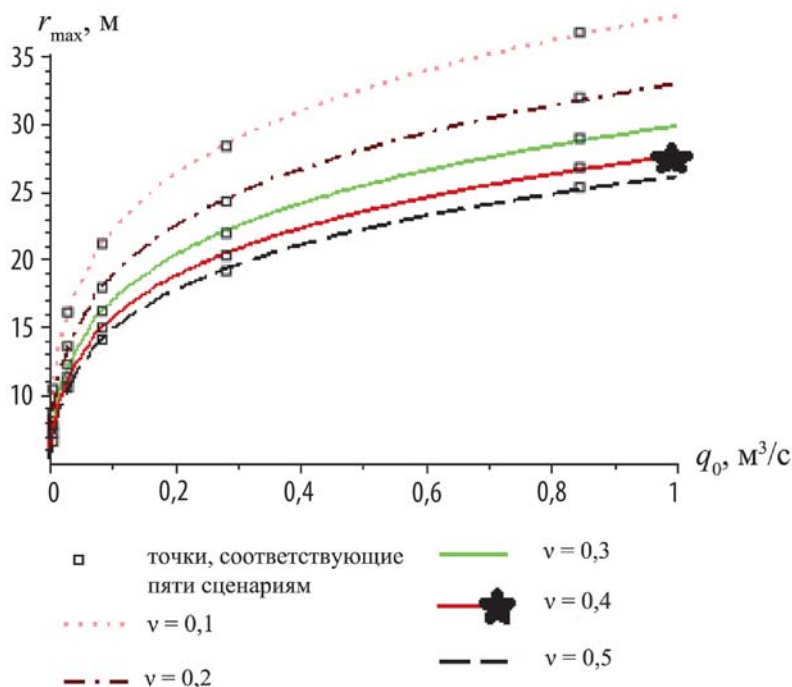


Рис. 6. Зависимость радиуса загрязнения от объемной мощности источника

x, y, z — координаты. Размерность h и a — соответственно м и m^2/c .

Нефтеемкость грунта v определена согласно [9]. Источник растекания определяется следующим образом:

$$Q = q(t)\delta(x)\delta(y)\delta(z),$$

где $q(t) = \begin{cases} q_0, & t < T, \\ 0, & t \geq T \end{cases}$ — объемная мощность источника;

T — время закрытия источника; δ — дельта-функция Дирака.

Расположение источника отражено на рис. 5.

Расчеты осуществлены для плоской поверхности при следующих условиях: $H = 2$ м, $T = 3$ ч, $h_{пр} = 0,4$ м, $\beta_{нз} = 75$ МПа⁻¹, $\beta_{ж} = 0,822$ ГПа⁻¹, $m_0 = 0,92$, $\rho_0 = 820$ кг/м³, $\mu = 8$ сСт, $\varepsilon_0 = 1 \cdot 10^{-5}$ м/с [10; 11; 12].

Параметр q_0 изменяется в промежутке от 0,00565 до 0,84688 м³/с для пяти сценариев в соответствии с уровневой классификацией разливов нефти: первый уровень — до 100 т, пятый уровень — свыше 5000 т [13]. Расчеты выполнены для средних градаций: 50, 250, 750, 2500 и 7500 т. Результаты расчетов максимального радиуса загрязнения на плоской поверхности, сложенной торфяниками, представлены на рис. 6.

Аппроксимируя полученные результаты нелинейным методом наименьших квадратов, получаем следующую аналитическую зависимость величины максимального радиуса загрязнения r от мощности источника q_0 :

$$r_{\max} = b_0 + b_1 \ln(q_0) + b_2 [\ln(q_0)]^2. \quad (4)$$

Для различных величин нефтеемкости грунта ($v = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5$) коэффициенты регрессии принимают следующие значения (при возрастании v): b_0 — от 37,901 до 26,063, b_1 — от 8,137 до 5,869, b_2 — от 0,553 до 0,414.

Поскольку при расчетах принималось допущение о горизонтальности поверхности, площадь загрязнения S ограничена окружностью радиусом r , что позволяет ее вычислить. Тогда максимальная площадь загрязнения составит около 4000 м². Для выбранных сценариев это не так уж мало — около половины гектара. Если принять во внимание затраты на устранение последствий аварийного разлива и рекультивацию растительно-почвенного покрова, то стоимость восстановительных работ составит порядка 40—50 млн руб. в ценах 2012 г. [14].

Полученное решение удовлетворяет немногим реальным ситуациям, но обладает относительной простотой расчета, вследствие этого в качестве следующего шага исследования предполагается разработка численного решения, позволяющего учесть произвольный рельеф поверхности почвы и функцию источника, что даст возможность получить оценки нефтяного загрязнения прибрежной зоны для различных сценариев аварийных разливов и различных типов грунтов.

Таким образом, предложенный подход к оценке потенциального загрязнения, основанный на гидродинамическом моделировании процессов эволюции нефтяного разлива на земной поверхности, позволяет оценить масштабы нефтяного загрязнения в западной части российского сектора Арктики.

Литература

1. Павленко В. И. Фундаментальные научные исследования в интересах локализации и ликвидации разливов нефти в Арктике // Вестн. Совета безопасности Российской Федерации. — 2011. — № 5 (17). — С. 154—161.
2. Павленко В. И. Экостандарт для Баренца // Нефть России. — 2012. — № 4. — С. 71—76.
3. Pavlenko V. Oil spills — risk management and decision support system. — Brussels: Russia-NATO Proceedings of the Scientific Council, 2008.
4. Павленко В. И. Проблемы и перспективы экологической безопасности Арктической зоны Российской Федерации // Вестн. Совета безопасности Российской Федерации. — 2012. — № 4 (22). — С. 118—125.
5. Юдахин Ф. Н., Губайдуллин М. Г., Коробов В. Б. Экологические проблемы освоения нефтяных

месторождений севера Тимано-Печорской провинции. — Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. — 315 с.

6. Губайдуллин М. Г., Коробов В. Б. Экологический мониторинг нефтегазодобывающих объектов Европейского Севера России: Учебное пособие. — Архангельск: ИПЦ Север. (Аркт.) федер. ун-та, 2012. — 236 с.

7. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. — М.: Наука, 1977. — 678 с.

8. Муангу Ж. Э. Р. Фильтрация из канала: Структура решения и оценка расхода // Известия Рос. академии наук. Механика жидкости и газа. — 2006. — № 1. — С. 108—120.

9. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах. — М., 1995. — 96 с.

10. Трофимов В. Т., Королёв В. А., Вознесенский Е. А. и др. Грунтоведение. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — 1024 с.

11. Дриацкая З. В., Мхчян М. А., Жмыхова Н. М. Нефти СССР: Справочник. — Т. 1. — М.: Химия, 1971. — 504 с.

12. ГОСТ 8.602-2010 ГСИ. Плотность нефти. Таблицы пересчета.

13. Постановление Правительства РФ «О порядке организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации» от 15 апреля 2002 г. № 240.

14. Коробов С. В., Коробов В. Б., Бречалова Е. М. Эколого-экономическая оценка потенциальных аварий на законсервированных нефтяных скважинах в северной части Тимано-Печорской провинции // Вестн. Арханг. гос. техн. ун-та. Сер. «Прикладная геоэкология». — 2009. — Вып. 82. — С. 108—116.