

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА НОРМИРОВАНИЯ УРОВНЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ НА ТЕРРИТОРИИ ОБЪЕКТОВ ДОБЫЧИ И ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

А. А. Макоско^{1,2,3}, Л. А. Королева^{4,5}, И. Г. Малыгин⁵, А. А. Таранцев⁵, Р. Г. Зайкин⁴

¹ Российская академия наук (Москва, Российская Федерация)

² Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН (Москва, Российская Федерация)

³ Российский университет транспорта (Москва, Российская Федерация)

⁴ Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы

МЧС России (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

⁵ Институт проблем транспорта имени Н. С. Соломенко РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Для цитирования

Макоско А. А., Королева Л. А., Малыгин И. Г., Таранцев А. А., Зайкин Р. Г. Обоснование метода нормирования уровня нефтяного загрязнения почв на территории объектов добычи и транспортировки нефти в Арктической зоне // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 4. — С. 585—595. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-585-595

Статья поступила в редакцию 27 августа 2024 г.

Мониторинг состояния почвенного покрова при эксплуатации нефтегазодобывающих и транспортных объектов Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) требует установления норм допустимого нефтяного загрязнения почв. В этой связи обоснован метод нормирования уровня нефтяного загрязнения почв с помощью определения концентрации нефти и нефтепродуктов арбитражным ИК-спектроскопическим методом. Определены параметры нормирования содержания нефти и нефтепродуктов в почвах. Эти параметры могут быть приняты за основу перспективной системы локального нормирования, так как позволяют учитывать фоновое содержание органических веществ в почвах, классифицировать их по степени нефтяного загрязнения, выделять признаки возникновения чрезвычайной экологической ситуации. Представлена последовательность реализации метода нормирования на локальном уровне нефтяного загрязнения почв на территории объектов добычи и транспортировки нефти, расположенных в АЗРФ. Метод реализован на территории Мусюршорского месторождения Архангельской области.

Ключевые слова: Арктическая зона, загрязнение почвы нефтепродуктами, мониторинг, регрессионный анализ, метод нормирования, чрезвычайная ситуация.

Введение

Ключевая роль в развитии нефтедобывающей промышленности в нашей стране принадлежит Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ), которая в настоящее время обеспечивает полу-

ние более 17% нефти¹. Прогнозируется увеличение добычи нефти в АЗРФ до 22% к 2030 г. и до 25%

¹ Указ Президента РФ «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» (с изменениями и дополнениями) от 26 октября 2020 г. № 645. — URL: <https://base.garant.ru/74810556/>.

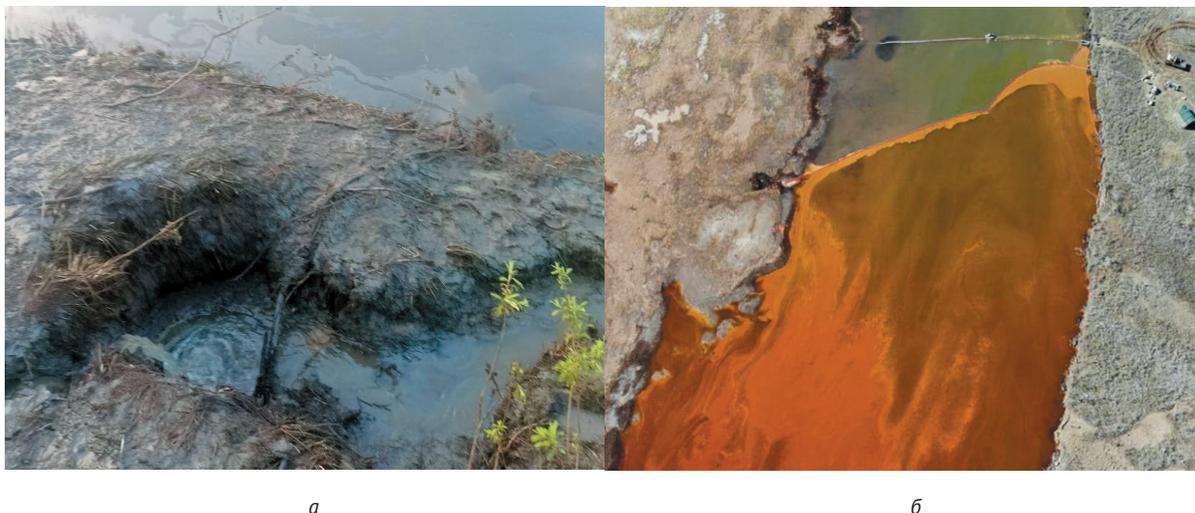


Рис. 1. Загрязнение почвы нефтепродуктами: а – на Южно-Ошском нефтяном месторождении*, б – в Норильске**
 Fig. 1. Soil pollution by oil products: а – at the Yuzhno-Oshskoye oil field, б – in Norilsk

*<https://rg.ru/2023/07/03/reg-szfo/v-komi-ploshchad-zagrizneniia-pochvennogo-pokrova-nefteproduktami-sostavliaet-09-gektara.html>.

**Фото: ilya_torgonskiy / Instagram.

к 2035 г. [1]. По оценкам [2], разведанные запасы нефти в АЗРФ составляют до 20—25% общих объемов запасов, приходящихся на всю территорию России.

В АЗРФ реализуются нефтегазовые проекты, которые предполагают как добычу сырья, так и его транспортировку, которая является необходимым условием освоения углеводородных ресурсов и осуществляется с использованием морского танкерного флота, трубопроводной системы, автомобильного и железнодорожного транспорта. С нефтегазодобывающим и транспортным секторами экономики связаны перспективы развития АЗРФ [3; 4].

Объекты добычи и транспортировки нефти оказывают существенное негативное влияние на окружающую природную среду [5]. С ростом масштабов добычи, объемов транспортировки, использования и хранения увеличиваются риски возникновения техногенных аварий и чрезвычайных ситуаций (ЧС), значительная часть которых сопровождается разливами нефти и нефтепродуктов [6—9]. Например, в июле 2023 г. вследствие отказа трубопровода на Южно-Ошском месторождении на территории округа Усинск произошел масштабный разлив нефти, которая растекалась по рельефу местности и попала в реку [9]. Около 0,9 га почвенного покрова оказались загрязненными (рис. 1а).

ЧС федерального уровня возникла в мае 2020 г. при разгерметизации бака с дизельным топливом в районе Норильска вследствие проседания опор. Из общего объема разлитых нефтепродуктов (примерно 21 тыс. т) около 6 тыс. т попали в грунт, примерно 15 тыс. т — в водоемы (рис. 1б). Оповещение о разливе поступило только через двое суток, что значительно увеличило масштаб ЧС и причиненный ущерб [7].

В марте 2006 г. произошла крупнейшая в истории Аляски (США) экологическая катастрофа, связанная с разливом нефти. Попадание в почву около 1000 м³ углеводородного сырья связано с коррозией нефтепровода и несрабатыванием системы обнаружения утечек. В результате нефть покрывала приблизительно 1 га тундры, птицы и животные были вынуждены покинуть загрязненную территорию [8].

В июле 2003 г. при разгерметизации нефтепровода Мусюршор — Сандивей, по которому осуществляется транспортировка нефти со скважины № 60 Мусюршорского нефтяного месторождения, произошел крупный разлив. По рекам Сандивей и Колва нефтяное загрязнение распространилось на расстояние около 70 км. Оказались загрязненными значительная площадь тундры и покрывающая ее растительность.

Крупнейшим разливом нефти на суше является катастрофа, произошедшая летом 1994 г. на промысловом нефтепроводе Возей — Усинск. Возникновение более 50 мест прорыва было обусловлено интенсивным протеканием коррозионных процессов. В течение двух месяцев по нефтепроводу продолжали качать нефть. На поверхность попало более 100 тыс. т нефти, которая загрязнила огромные территории суши и водоемы [8].

Арктика обладает рядом особенностей, которые необходимо учитывать при формировании стратегии, разработке и осуществлении мер обеспечения экологической безопасности и реагирования на возникающие аварии и ЧС. Загрязнение почв нефтью и нефтепродуктами формирует новую экологическую обстановку, изменяя структуру, химический состав и свойства почв, оказывает существенное влияние на человека, растительный и животный мир [8—10].

В «Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года»² совершенствование системы мониторинга рассматривается как одна из приоритетных задач в сфере охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности АЗРФ. Для эффективного проведения почвенного экологического мониторинга необходимо сформировать систему параметров, определяющих состояние почвы, установить критерии и нормы техногенного воздействия и обеспечить возможность сопоставления с ними полученных экспериментальных данных.

В настоящее время проблема разработки норм допустимого загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами на локальном уровне не решена [9; 11—17]. Из общего количества установленных в России предельно допустимых концентраций (ПДК) для почв приблизительно десять относятся к нефтепродуктам. Отсутствие подтвержденного (нормированного) значения ПДК валового содержания нефти и нефтепродуктов значительно осложняет оценку локального загрязнения почв, затрудняет прогнозирование ЧС, связанных с почвенными разливами нефти и нефтепродуктов и увеличивает время реагирования на них [13; 16].

Применение существующей системы глобального нормирования содержания нефти и нефтепродуктов в почвах не позволяет учесть особенности АЗРФ, связанные:

- со спецификой почв;
- с уникальностью природы и климатическими особенностями;
- с возможностью содержания в почвах соединений, идентичных загрязняющим веществам;
- с закономерностями рассеяния нефти и нефтепродуктов в окружающей среде и др.

Поэтому локальная система наблюдений, которую в основном используют объекты нефтегазовой отрасли, должна основываться на локальной системе нормативов. Актуальным является решение задач нормирования нефтяного загрязнения почв на локальном уровне [9; 12—17].

Цель работы заключается в разработке метода локального нормирования нефтяного загрязнения почв на территории объектов добычи и транспортировки нефти, расположенных в АЗРФ.

Материалы и методы исследования

Проведено исследование локальной территории скважины Мусюршорского нефтяного месторождения, расположенного в центральной части Хорейверской низменности Архангельской области, которое было открыто в 1983 г. При отборе проб соблюдались единые требования, установленные

ГОСТ 17.4.3.01—2017³ и ГОСТ 17.4.4.02—2017⁴. Были отобраны 52 образца почв в районе нефтяной скважины № 60 и трубопровода, по которому осуществляется транспортировка нефти.

Выбор метода обнаружения нефтяного загрязнения в почвах АЗРФ основан на следующих критериях [9]:

- селективности (избирательности) метода, возможности обнаружения загрязняющих веществ при наличии фоновых концентраций органических соединений;
- оперативности получения результатов, которая достигается использованием упрощенной процедуры отбора проб, отсутствием требований к высокой квалификации персонала, использованием оборудования, не требующего установки в стационарных условиях.

Для уменьшения времени обследования территорий большой протяженности с целью оценки степени их загрязнения, выявления и прогнозирования ЧС целесообразно применять экспрессные скрининговые методы анализа [11; 18]. Их применение не дает возможности исследовать индивидуальный состав нефти и нефтепродуктов, но позволяет получить оценку их суммарного содержания и выделять зоны территории с различным уровнем загрязнения.

В качестве скринингового применен арбитражный ИК-спектроскопический метод определения содержания нефти и нефтепродуктов в почвах, выбор которого обоснован в [9]. При измерениях использована методика, допущенная для целей государственного экологического контроля⁵. Применение скрининговых технологий требует изучения большого количества проб. Для объективного использования результатов необходимо разработать систему обработки экспериментальных данных и обосновать параметры нормирования уровня нефтяного загрязнения на локальном участке территории АЗРФ, размеры которого соответствуют площади изучаемого производственного объекта. Пространственная дискретность измерений определяется в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01—2017. Для достоверной оценки результатов с помощью вероятностно-статистических методов достаточно 25—30 измерений [9].

В представленном исследовании использован подход к экологическому нормированию, аргументированный в [17], основывающийся на определении критических точек (участков, где происходят

² Указ Президента РФ «Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года» (с изменениями и дополнениями) от 5 марта 2020 г. № 164. — URL: <https://base.garant.ru/73706526/?ysclid=lyvtjgoxw6859460434>.

³ ГОСТ 17.4.3.01—2017 Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. — М.: Страндартинформ, 2017. — 5 с.

⁴ ГОСТ 17.4.4.02—2017 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. — М.: Страндартинформ, 2017. — 10 с.

⁵ Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии. ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. — М., 2005. — URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/17f/4293831615.pdf?ysclid=lyw0yctyt275300772>.

качественные скачки) функции, аппроксимирующей экспериментальную зависимость «доза — эффект». Выявление критических точек проводилось с помощью анализа производных этой функции.

Методы установления уровней загрязнения с использованием критических точек функции имеют ряд существенных преимуществ [17—19]:

- позволяют формализовать процедуру определения искомым величин;
- реализуют обоснованные в работе [19] представления о ступенчатом характере зависимости «доза — эффект»;
- допускают изменение параметра, классифицируемое как незначительное;
- являются более объективными, чем методы определения предельной нагрузки на экосистему, например, с использованием ПДК.

Результаты исследований

Концентрации соединений нефти и нефтепродуктов в изученных образцах почв ($C_{\text{НП}}$), полученные с использованием ИК-спектроскопического метода, варьировались от 40 до 4950 ppm. Для выборки из 52 измерений математическое ожидание составило 2,679, дисперсия — 0,310, коэффициент асимметрии — 0,135, коэффициент эксцесса — 1,019. Для упрощения анализа результатов экспериментов и обеспечения возможности их наглядного графического представления полученные экспериментальные данные представлены в логарифмической шкале. Значения логарифмов концентраций содержания нефти и нефтепродуктов в исследуемых образцах почв изменялось в интервале $\lg C_{\text{НП}} = 1,6—3,7$.

Обработка экспериментальных данных проводилась двумя способами.

1. Использование вероятностного закона распределения непрерывной случайной величины. Решение основано на использовании функции плотности распределения вероятности для аппроксимации гистограммы распределения относительных частот встречаемости значений логарифмов концентраций нефтепродуктов в почве (рис. 2).

Оценка показала, что случайная величина $x = \lg C_{\text{НП}}$ подчиняется β -распределению с плотностью:

$$f(x) = 0,549(x-1,6)^{0,264}(3,7-x)^{0,491},$$

$$x \in [1,6; 3,7].$$

Проведено сопоставление кумуляты 1 гистограммы с функцией 2 (см. рис. 2) бета-распределения (рис. 3).

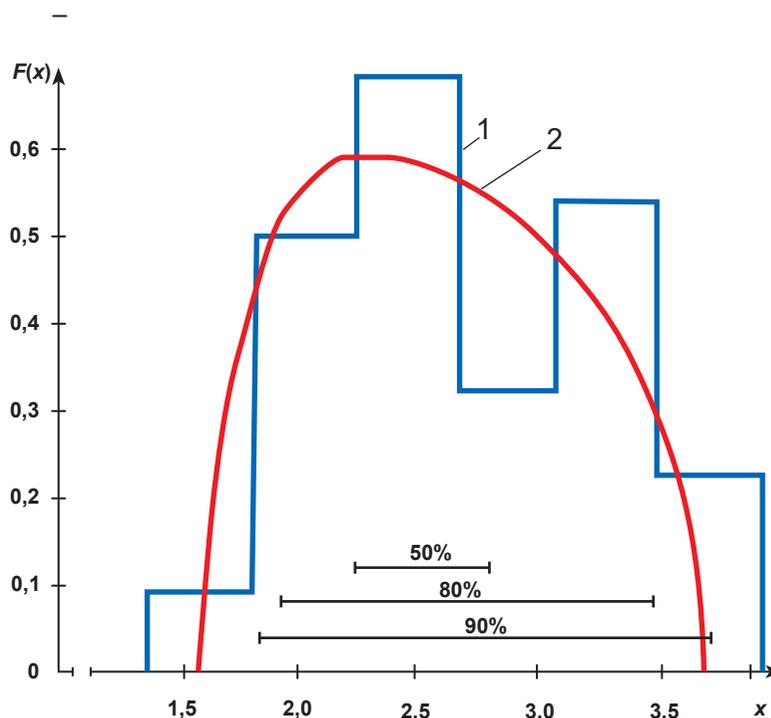


Рис. 2. Аппроксимация гистограммы (1) плотностью распределения (2). Составлено авторами
Fig. 2. Histogram approximation (1) by the distribution density (2). Compiled by the author

Найдена точка перегиба x_n функции распределения $F(x)$ путем приравнения к нулю ее второй производной:

$$f''(x) = \frac{0,9676 - 0,4145x}{(x-1,6)^{0,736}(3,7-x)^{0,509}}.$$

Получено значение $x_n = 2,33$. При этом $f(2,33) = 0,59$, $F(2,33) = 0,38$. Значение x_n разделяет относительно слабозагрязненные и сильнозагрязненные почвы. Поэтому оно является пороговым значением.

Анализ функции на выпуклость и вогнутость с использованием второй производной показал, что на интервале $[1,60; 2,67]$ функция вогнута; на интервале $[2,67; 3,70]$ — выпукла. Точку 2,67 можно считать критической.

Таким образом, получены две критические точки: первая соответствует $\lg C_{\text{НП}} = 2,3$, тогда $C_{\text{НП}} \approx 200$ ppm; вторая определяется $x = \lg C_{\text{НП}} = 2,7$, в этом случае $C_{\text{НП}} \approx 500$ ppm.

Существенным ограничением использования бета-распределения для нормирования уровня нефтяного загрязнения для почв является наличие предельных значений, которые может принимать случайная величина. В проведенных экспериментах $1,6 \leq \lg C_{\text{НП}} \leq 3,7$

При значении $\lg C_{\text{НП}} < 1,6$ ($C_{\text{НП}} < 40$ ppm) это ограничение не является определяющим, почвы будут относиться к незагрязненным. Однако, например, при аварийных разливах нефти и возникновении ЧС на исследуемой локальной территории АЗРФ значение $\lg C_{\text{НП}}$ может превысить

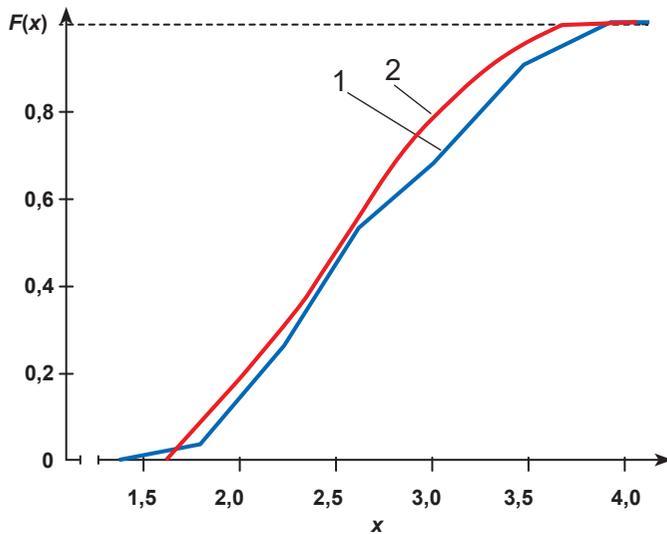


Рис. 3. Сопоставление кумуляты 1 гистограммы с функцией 2 бета-распределения. Составлено авторами
Fig. 3. Comparison of the cumulates 1 of the histogram with the function 2 of the beta distribution. Compiled by the authors

3,7 ($C_{\text{нп}} < 4950$), что требует поиска других путей нормирования уровня загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами.

2. Целесообразность использования логистической функции в качестве аналитической формы изменения $C_{\text{нп}}$ обусловлена следующими преимуществами [16—20]:

аппроксимация логистическим уравнением дозовых зависимостей для экосистемных параметров, большая часть которых имеет вид S-образной кривой;

- обоснованность установления предельно допустимых дозовых нагрузок и выявления признаков ЧС, что обуславливается доказанными возможностями использования логистического уравнения для выражения представления о существовании пределов устойчивости экосистем к воздействиям и наличии порога дозовой зависимости;
- гибкость применяемого математического аппарата, что связано с высокой степенью общности при описании с помощью логистического уравнения различных кривых, в том числе отличающихся от S-образных;
- объективность установления величины порогов (например, уровня, соответствующего возникновению ЧС), что определяется наличием критических точек на логистической кривой, которым может быть дана содержательная интерпретация.

Оценка проводилась в следующей последовательности.

Диапазон значений десятичных логарифмов содержания нефтепродуктов был разбит на равные интервалы. Построенная гистограмма распределения частот встречаемости непрерывной случайной величины $x = \lg C_{\text{нп}}$ в изученных образцах почв по выбранным интервалам аппроксимирована плотностью распределения (рис. 4а). Максимум частот-

ного распределения $\lg C_{\text{нп}}$ лежит в третьем интервале 2,30—2,65.

На логистической кривой выделяют три критические точки, определяющие начало, середину и конец быстрых изменений и соответствующие им области. Область между крайними критическими точками является нестабильной. Для нее характерен быстрый переход из одного состояния в другое, в теории катастроф он представляется топологической структурой типа «складка» [17]. Изменения исследуемого параметра характеризуются высокой скоростью. Рассматриваемой области принадлежит вторая критическая точка, в которой значение функции соответствует 50%-ному изменению параметра.

Область до первой критической точки рассматривается как стабильная. Она характеризуется незначительным изменением параметра и соответствует его фоновому значению. В области, расположенной после третьей критической точки, параметр стабилизируется на высоком уровне, что характеризует систему с практически «нулевой жизнеспособностью» [17].

Функция распределения $F(x)$ случайной величины x (см. рис. 4а) может быть представлена сигмоидальной функцией Больцмана:

$$F(x) = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp\left(\frac{x - x_0}{\tau}\right)}, \quad (1)$$

где A_1 и A_2 — начальный и конечный уровни функции $F(x)$; x_0 — значение $\lg C_{\text{нп}}$ в точке перегиба сигмоидальной функции Больцмана, в которой функция наполовину перешла с уровня на уровень; x — значения $x = \lg C_{\text{нп}}$; τ — параметр, определяющий ширину области перехода с уровня на уровень.

Для исследуемой случайной величины $x = \lg C_{\text{нп}}$ уравнение (1) может быть записано следующим образом:

$$F(x) = 1 - \frac{0,95}{1 + e^{\frac{(x-2,3)}{1,05}}}.$$

Достоверность аппроксимации $R^2 = 0,91$.

Точка перегиба сигмоидальной функции $x_0 = 2,3$ определяет середину быстрых изменений, она соответствует значению $F(x)$, равному 0,53. Критическое значение при аргументе 2,3 рассматривается как пороговое, позволяющее определить верхнюю границу малозагрязненных почв. Преобразуя логарифмическую шкалу в абсолютные значения концентраций нефтепродуктов в почве, получим пороговое значение $C_{\text{нп}}$ на исследуемой территории, равное 200 ppm. Это хорошо согласуется с результатом, полученным первым из представленных способов обработки результатов (с использованием бета-распределения).

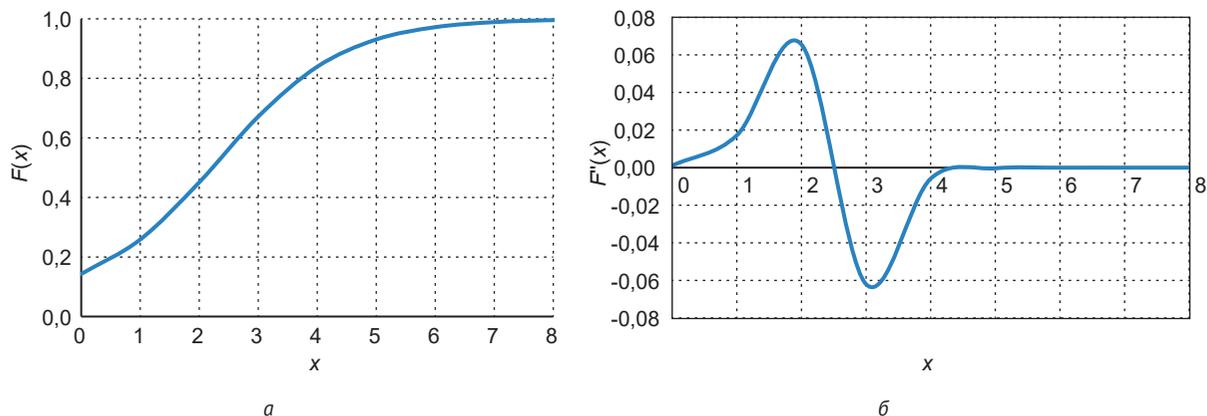


Рис. 4. Функция распределения случайной величины $x = \lg C_{\text{нп}}$ в изученных образцах почв АЗРФ (а) и график ее второй производной (б). Составлено авторами
 Fig. 4. The distribution function of the random variable $x = \lg C_{\text{нп}}$ in the studied soil samples of AZRF (a) and graph of its second derivative (б). Compiled by the author

Для более детальной классификации уровня нефтяного загрязнения почв локальной территории, включающей объекты добычи и транспортировки нефти скважины № 60 Мусюршорского месторождения, каждый из выделенных интервалов следует разбить на дополнительные участки. Поставленная задача решается путем нахождения второй производной функции распределения $F(x)$ (см. рис. 4б).

Границы выделенных областей находили как точки максимальной выпуклости функции вверх и вниз. При этом вторая производная принимает максимальное и минимальное значения. Значение $\lg C_{\text{нп}} = 1,9$ делит область относительно низких значений нефтяного загрязнения на два участка. При $\lg C_{\text{нп}} < 1,9$ ppm почвы можно отнести к условно чистым, содержание органических веществ в них соответствует фоновому уровню, не превышающему 80 ppm.

При значении $\lg C_{\text{нп}} = 3,0$ наблюдается минимальное значение второй производной. В рассматриваемой точке $C_{\text{нп}} = 1000$ ppm.

Приведенная выше градация уровней загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами по порядку значений близка к показателям уровня загрязнения земель химическими веществами⁶ и согласуется со значениями, представленными другими авторами [13].

Обсуждение

Основываясь на полученных значениях аргумента в критических точках, можно выделить параметры локального нормирования уровня нефтяного загрязнения на изученной территории (рис. 5).

В качестве критерия экологической оценки состояния почв для обоснования вывода о возникно-

вании чрезвычайной экологической ситуации при нефтяном загрязнении территорий используется значение 10–20 ПДК⁷. Учитывая, что величина суммарного ПДК для нефти и нефтепродуктов в почве не установлена, воспользуемся методикой, представленной в [20], согласно которой за ПДК принимается значение аргумента в точке перегиба сигмоидальной функции Больцмана. Применительно к рассматриваемому локальному участку территории АЗРФ с расположенными на нем объектами добычи и транспортировки нефти это значение составляет $\lg C_{\text{нп}} = 2,3$, что соответствует $C_{\text{нп}} = 200$ ppm. При $C_{\text{нп}} \geq 15 \cdot 200 = 3000$ ppm на рассматриваемом участке территории складывается чрезвычайная экологическая ситуация.

Последовательность реализации метода нормирования на локальном уровне нефтяного загрязнения почв на территории объектов добычи и транспортировки нефти, расположенных в АЗРФ, представлена на рис. 6.

Обоснование полученных нормативных значений продолжает исследования, основанные на принципах локального нормирования [9; 31; 17–19], и отличается от них установлением фоновых значений содержания органических веществ в почве на исследуемой территории. Разработанный метод хорошо согласуется с результатами работы [20] в части обоснования численных значений критериев возникновения чрезвычайной экологической ситуации на рассматриваемой локальной территории.

Метод реализован на территории Мусюршорского месторождения. Его применение на других участках АЗРФ, где расположены объекты добычи и транспортировки нефти, позволит учесть особенности

⁶ Письмо Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ «О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами» от 27 декабря 1993 г. № 04-25, Комитета РФ по земельным ресурсам и землеустройству от 27 декабря 1993 г. № 61-5678. – URL: <https://docs.cntd.ru/>.

⁷ Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. – Утв. Министерством охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ 30 ноября 1992 г. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901797511?ysclid=lywxhx1fu1116674753>.

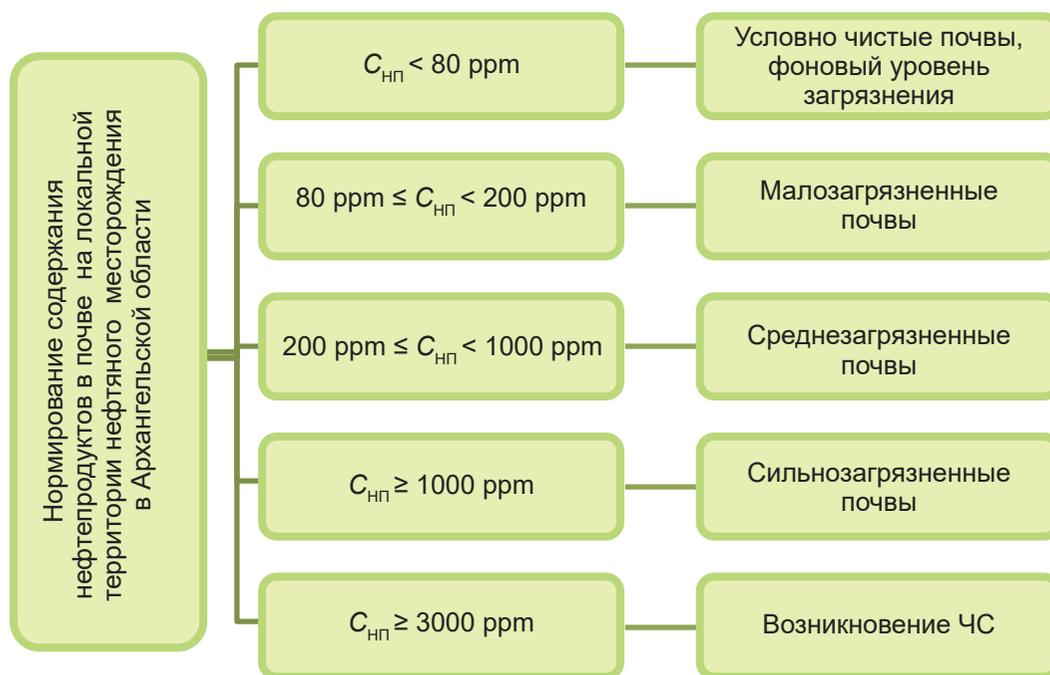


Рис. 5. Параметры локального нормирования уровня нефтяного загрязнения почв на территории объектов добычи и транспортировки нефти Мусюршорского месторождения. Составлено авторами
Fig. 5. Parameters of local regulation of the level of oil pollution of soils on the territory of oil production and transportation facilities of the Musyrshorskoye field. Compiled by the authors

и установить параметры локального нормирования уровня нефтяного загрязнения.

При необходимости установить индивидуальный состав загрязняющих веществ в почве необходимо провести анализы на молекулярном уровне. Применение предлагаемого метода нормирования позволит сократить объем таких анализов. Достаточно детального анализа двух-трех образцов из каждой выделенной группы (мало- или среднезагрязненные почвы и т. д.).

Исследование риска для растительных экосистем АЗРФ от загрязнения атмосферного воздуха [21] в дальнейших исследованиях может быть продолжено путем изучения состояния почвы как универсального индикатора химического загрязнения окружающей среды.

Для автоматизации сбора и обработки мониторинговой информации об экологической обстановке в АЗРФ в перспективе целесообразно создать интеллектуальную систему экологической безопасности (ИСЭБ) Северного морского пути и АЗРФ. Рассматриваемая в [22] концепция ИСЭБ основана на анализе экологических параметров, сборе и обработке данных о состоянии окружающей среды в АЗРФ, а также на использовании современных моделей и алгоритмов для прогнозирования и мониторинга экологической ситуации. Планируется интеграция разрабатываемой системы с уже существующими технологиями и объектами инфраструктуры арктического региона и Северного морского пути, что позволит более эффективно контролировать экологические аспекты транспортной деятель-

ности при транспортировке нефтепродуктов различными видами транспорта.

Расчетные характеристики сетей экологических зондов должны быть определены с учетом особенностей арктической среды, включая изменяющиеся климатические условия, сезонные вариации и географическое разнообразие региона с учетом социально-экономического аспекта. Эти характеристики должны обеспечивать эффективное покрытие всей территории АЗРФ, а также учитывать потребность в мониторинге различных экологических параметров, включая состояние льда, температуру воды, химические составы и другие факторы, влияющие на экосистему.

Заключение

Перспективы освоения АЗРФ связаны с развитием нефтегазодобывающих и транспортных объектов. В процессе их эксплуатации возможны аварийные разливы нефти и нефтепродуктов. При мониторинге состояния почвенного покрова требуется установить нормы допустимого нефтяного загрязнения почв.

Обосновано, что нормирование уровня опасного нефтяного загрязнения почв для расположенных в АЗРФ территорий объектов добычи и транспортировки нефти должно осуществляться с использованием локальных нормативов.

Разработан метод нормирования, основанный на полученных с использованием технологий скрининга результатах массовых анализов содержания нефти и нефтепродуктов в исследуемых образцах почв.

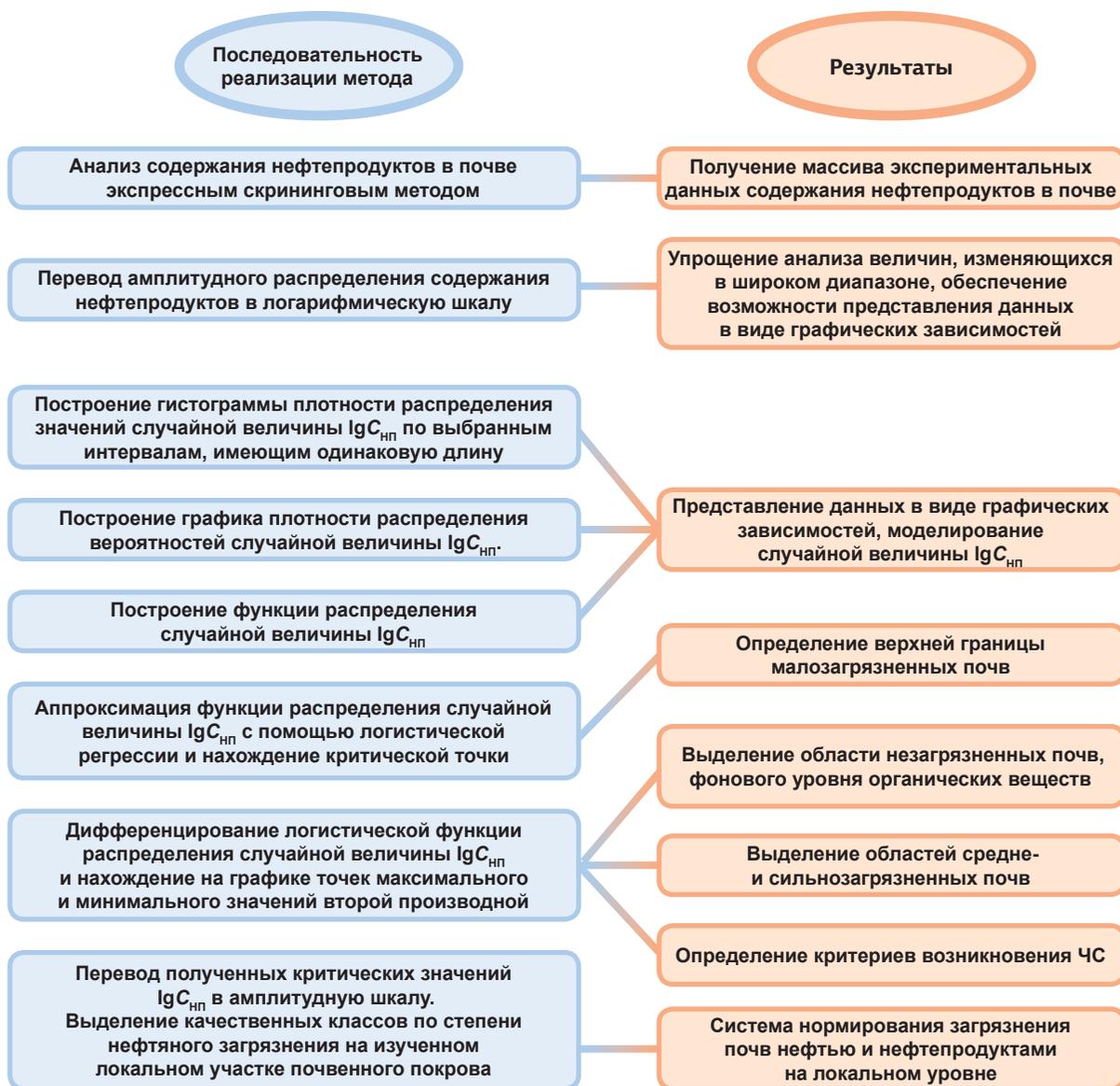


Рис. 6. Последовательность реализации метода нормирования на локальном уровне нефтяного загрязнения почв на территории объектов добычи и транспортировки нефти, расположенных в АЗРФ. Составлено авторами

Fig. 6. Sequence of the method implementation for local regulation of oil pollution of soils on the territory of oil production and transportation facilities located in the AZRF. Compiled by the author

Обработка массива экспериментальных данных проведена с использованием логистической регрессии.

Определены параметры локального нормирования содержания нефтепродуктов на территории объектов добычи и транспортировки нефти Мусоршорского месторождения. Установлено, что на исследуемой территории почвы с содержанием нефтепродуктов менее 80 ppm относятся к условно чистым, имеющим фоновый уровень загрязнения. Сильнозагрязненные почвы соответствуют концентрации нефтепродуктов, превышающей 1000 ppm. Достижение рассматриваемым показателем значения 3000 ppm свидетельствует о возникновении чрезвычайной экологической ситуации на соответствующем участке территории.

Отмеченные параметры позволяют учитывать фоновое содержание органических веществ в почвах, расположенных на территории объектов добычи и транспортировки нефти АЗРФ, классифицировать их по степени нефтяного загрязнения, выделять признаки возникновения чрезвычайной экологической ситуации. Таким образом, эти параметры могут быть приняты за основу перспективной системы локального нормирования.

Финансирование

Работа выполнена в соответствии с госзаданиями Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН и Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН при поддержке программы стратегиче-

ского академического лидерства «Приоритет-2030» (стратегический проект № 5 Российского университета транспорта).

Литература/References

1. Воронина Е. П. Логистика нефтегазотранспорта Арктического региона Российской Федерации: современное состояние и приоритеты развития // Экономика и бизнес: теория и практика. — 2020. — № 11-1. — С. 174—183.
Voronina E. P. Logistics of oil and gas transportation in the Arctic region of the Russian Federation: current state and development priorities. *Economics and Business: theory and practice*, 2020, no. 11-1, pp. 174—183. DOI: 10.24411/2411-0450-2020-10891. (In Russian).
2. Петенко А. В. Развитие нефтедобывающего сектора на территории Арктической зоны России: Проблемы и перспективы // Прогрессив. экономика. — 2023. — № 2. — С. 70—84.
Petenko A. V. Development of the oil sector in the Arctic zone of Russia: Problems and prospects. *Progressive economy*, 2023, no. 2, pp. 70—84. DOI: 10.54861/27131211_2023_2_70. (In Russian).
3. Глухарева Е. К. Перспективы добычи и транспортировки нефтегазовых ресурсов Запада российской Арктики // Проблемы прогнозирования. — 2011. — № 5.
Glukhareva E. K. Prospects of extraction and transportation of oil and gas resources of the West of the Russian Arctic. *Forecasting problems*, 2011, no. 5. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-dobychi-i-transportirovki-neftegazovykh-resurov-zapada-rossiyskoy-arktiki>. (In Russian).
4. Гурлев И. В., Макоско А. А., Малыгин И. Г. Анализ состояния и развития транспортной системы Северного морского пути // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12, № 2. — С. 258—270.
Gurlev I. V., Makosko A. A., Malygin I. G. Analysis of the state and development of the transport system of the Northern Sea Route. *Arctic: Ecology and Economy*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 258—270. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-258-270. (In Russian).
5. Холкин Е. Г., Штриплинг Л. О., Ларионов К. С. Ликвидация последствий аварийных разливов нефтепродуктов в Арктической зоне России с использованием технологии реагентного капсулирования // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 1 (25). — С. 120—129.
Kholkin E. G., Shtripling L. O., Larionov K. S. The elimination of emergency oil spills consequences in the Arctic zone of Russia using the reagent encapsulation technology. *Arctic: Ecology and Economy*, 2017, no. 1 (25), pp. 120—129. (In Russian).
6. Богоявленский В. И. Чрезвычайные ситуации при освоении ресурсов нефти и газа в Арктике и Мировом океане // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 4 (16). — С. 48—59.
Bogoyavlensky V. I. Emergencies in the development of oil and gas resources in the Arctic and the World Ocean. *Arctic: Ecology and Economy*, 2014, no. 4 (16), pp. 48—59. (In Russian).
7. Киракосян Д. В., Молчанова Я. П. Анализ первых последствий нефтяного разлива в Норильске // Успехи в химии и химической технологии. — 2021. — Т. 35, № 2 (237). — С. 43—46.
Kirakosyan D. V., Molchanova Ya. P. Analysis of the first consequences of the oil spill in Norilsk. *Advances in chemistry and chemical technology*, 2021, vol. 35, no. 2 (237), pp. 43—46. (In Russian).
8. Владимиров В. А. Разливы нефти: причины, масштабы, последствия // Стратегия гражд. защиты: проблемы и исследования. — 2014. — Т. 4, № 1 (6). — С. 217—229.
Vladimirov V. A. Oil spills: causes, scale, consequences. *Civil protection strategy: problems and research*, 2014, vol. 4, no. 1 (6), pp. 217—229. (In Russian).
9. Зайкин Р. Г., Королева Л. А., Петров Ю. С. Корреляционный анализ силы связи между результатами мониторинга аварийного нефтяного загрязнения почв скрининговыми методами // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2024. — № 2 (70). — С. 84—94.
Zaykin R. G., Koroleva L. A., Petrov Yu. S. Correlation analysis of the strength of the relationship between the results of monitoring of accidental oil pollution of soils by screening methods. *Problems of risk management in the technosphere*, 2024, no. 2 (70), pp. 84—94. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-84-94. (In Russian).
10. Behera I. D., Nayak M., Mishra A., Meikap B. C., Sen R. Strategic implementation of integrated bioaugmentation and biostimulation for efficient mitigation of petroleum hydrocarbon pollutants from terrestrial and aquatic environment. *Marine Pollution Bull.*, 2022, vol. 177, p. 113492.
11. Ноговицын Р. Р., Васильева А. М. Обеспечение экологической безопасности в Арктической зоне Российской Федерации // Проблемы соврем. экономики. — 2018. — № 4 (68). — С. 203—205.
Nogovitsyn R. R., Vasilyeva A. M. Ensuring environmental safety in the Arctic zone of the Russian Federation. *Problems of modern economics*, 2018, no. 4 (68), pp. 203—205. (In Russian).
12. Шарафутдинов Р. А., Митев А. Р., Романов А. А., Борисова И. В. Содержание нефтепродуктов в почвенном покрове г. Красноярск // Вестн. КрасГАУ. — 2018. — № 6 (141). — С. 289—293.
Sharafutdinov R. A., Mitev A. R., Romanov A. A., Borisova I. V. The content of petroleum products in the soil cover of Krasnoyarsk. *Bull. of KrasGAU*, 2018, no. 6 (141), pp. 289—293. (In Russian).
13. Околелова А. А., Капля В. Н., Лапченков А. Г. Оценка содержания нефтепродуктов в почвах // Регион. геосистемы. — 2019. — Т. 43, № 1. — С. 76—86.
Okolelova A. A., Kaplya V. N., Lapchenkov A. G. Assessment of the content of petroleum products in soils. *Regional geosystems*, 2019, vol. 43, no. 1, pp. 76—86. DOI: 10.18413/2075-4671-2019-43-1-76-86. (In Russian).

14. *Adebiji F. M., Olalekan E. O., Ore O. T., Adegunwa A. O.* Speciation, source identification, and risk assessments of potentially toxic metals in oil-impacted soils around petroleum products retailing stations. *Petroleum Research*, 2022. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2022.07.004.
15. *Шагидуллин Р. Р., Латыпова В. З., Иванов Д. В. и др.* Нормирование допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах // *Георесурсы*. — 2011. — № 5 (41). — С. 2—5.
- Shagidullin R. R., Latypova V. Z., Ivanov D. V., Shagidullina R. A., Tarasov O. Yu., Petrov A. M.* Normalization of the permissible residual content of oil and products of its transformation in soils. *Georesources*, 2011, no. 5 (41), pp. 2—5. (In Russian).
16. *Галишев М. А., Бельшина Ю. Н., Дементьев Ф. А. и др.* Нормирование допустимого содержания нефтяного загрязнения в почвенной среде // *Нефтяное хоз-во*. — 2021. — № 12. — С. 144—147.
- Galishev M. A., Belshina Yu. N., Dementiev F. A., Zaikin R. G., Lovchikov V. A., Reshetov A. P.* Normalization of the permissible content of oil pollution in the soil environment. *Neftyanoe hozyaistvo [Oil industry]*, 2021, no. 12, pp. 144—147. (In Russian).
17. *Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г.* Экологическое нормирование техногенных загрязнений земных экосистем (локальный уровень). — Екатеринбург: Наука, 1994. — 282 с.
- Vorobeychik E. L., Sadykov O. F., Farafontov M. G.* Ecological regulation of technogenic pollution of terrestrial ecosystems (local level), Yekaterinburg, Nauka, 1994, 282 p. (In Russian).
18. *Simpson R. W., Williams G., Petroeschovsky A., Morgan G., Rutherford S.* Associations between outdoor air pollution and daily mortality in Brisbane, Australia. *Arch. Environ. Health*, 1997, no. 6 (52), pp. 442—454.
19. *Singh A. K., Rattan R. K.* A new approach for estimating the phytotoxicity limits. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1987, vol. 9, no. 3, pp. 269—283.
20. *Левич А. П., Булгаков Н. Г., Рисник Д. В., Максимов В. Н.* Биоиндикация, экологическая диагностика и нормирование в методах мониторинга пресноводных экосистем // *Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем: Сборник материалов II Международной конференции, 10—14 октября 2011 г.* — СПб., 2011. — URL: <http://ecograde.bio.msu.ru/library/articles/levich%20s-p.pdf>.
- Levich A. P., Bulgakov N. G., Risnik D. V., Maksimov V. N.* Bioindication, ecological diagnostics and rationing in methods of monitoring freshwater ecosystems. *Bioindication in monitoring freshwater ecosystems: Proceedings of the II International Conference, October 10—14, 2011. Saint Petersburg, 2011.* Available at: <http://ecograde.bio.msu.ru/library/articles/levich%20s-p.pdf>. (In Russian).
21. *Макоско А. А., Матешева А. В., Лысова О. В.* Исследование риска для растительных экосистем АЗРФ от загрязнения атмосферы в условиях изменяющегося климата (в 1980—2050 гг.) // *Арктика: экология и экономика*. — 2023. — Т. 13, № 1. — С. 138—148.
- Makosko A. A., Matesheva A. V., Lysova O. V.* Study of the risk for plant ecosystems of the Russian Arctic from atmospheric pollution in a changing climate (1980—2050). *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 138—148. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-138-148. (In Russian).
22. *Малыгин И. Г., Коновалов И. Н., Королев О. А.* Развитие концепции интеллектуальной системы экологической безопасности Северного морского пути // *Морские интеллект. технологии*. — 2023. — № 4, ч. 1. — С. 134—142.
- Malygin I. G., Konovalov I. N., Korolev O. A.* Development of the concept of an intelligent system of environmental safety of the Northern Sea Route. *Marine Intelligent Technologies*, 2023, vol. 1, no. 4, pp. 134—142. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.017. (In Russian).

Информация об авторах

Макоско Александр Арнадьевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заместитель президента РАН, Российская академия наук (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 14), заведующий лабораторией, Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (119017, Россия, Москва, Пыжевский пер., д. 3), ведущий научный сотрудник, Российский университет транспорта (127994, ГСП-4, Россия, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), e-mail: aam@pran.ru.

Королева Людмила Анатольевна, доктор технических наук, доцент, профессор, Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России (196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН (199178, Россия, Санкт-Петербург, 12-я линия В.О., д. 13), e-mail: lyudamil@mail.ru.

Малыгин Игорь Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН (199178, Россия, Санкт-Петербург, 12-я линия В.О., д. 13), e-mail: malygin_com@mail.ru.

Таранцев Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН (199178, Россия, Санкт-Петербург, 12-я линия В.О., д. 13), e-mail: t__54@mail.ru.

Зайкин Руслан Григорьевич, адъюнкт, Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России (196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский просп., д. 149), e-mail: ruslan-zajkin@yandex.ru.

JUSTIFICATION OF THE METHOD FOR REGULATING THE LEVEL OF OIL POLLUTION OF SOILS ON THE TERRITORY OF OIL PRODUCTION AND TRANSPORTATION FACILITIES IN THE ARCTIC ZONE

Makosko, A. A.^{1,2,3}, Koroleva, L. A.^{4,5}, Malygin, I. G.⁵, Tarantsev, A. A.⁵, Zaykin, R. G.⁴

¹ Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

² Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

³ Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

⁴ Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Saint-Petersburg, Russian Federation)

⁵ Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (Saint-Petersburg, Russian Federation)

The article was received on August 27, 2024

For citing

Makosko A. A., Koroleva L. A., Malygin I. G., Tarantsev A. A., Zaykin R. G. Justification of the method for regulating the level of oil pollution of soils on the territory of oil production and transportation facilities in the Arctic zone. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 585-595.— DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-585-595. (In Russian).

Abstract

The development prospects of the Arctic zone are associated with oil production and transportation. During operation of oil production and transportation facilities emergency oil spills are possible. The monitoring of the soil cover state requires established standards for permissible oil pollution of soils. The study is aimed at developing a method for local regulation of oil pollution of soils on the territory of oil production and transportation facilities located in the Arctic zone.

Soil samples were studied in the local area of the Musyurshorskoye field, including oil production and transportation facilities. The arbitration IR spectroscopic method was used to determine the concentrations of oil and oil products in the soil. The authors have justified the feasibility of using logistic regression for processing the experimental data array.

A method has been developed and parameters for local regulation of oil and oil product content in soils on the territory of oil production and transportation facilities in the Arctic zone have been determined. The presented regulation system allows taking into account the background content of organic matter in soils in the studied area of the territory, classifying soils according to the degree of oil pollution, and identifying signs of an environmental emergency.

Keywords: Arctic zone, soil pollution with oil products, monitoring, regression analysis, regulation method, emergency.

Funding

The work was carried out in accordance with state assignments of the Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, the Obukhov Institute of Atmospheric Physics of RAS and was supported by the Strategic Academic Leadership Program "Priority-2030" (strategic project no. 5 of the Russian University of Transport).

Information about the authors

Makosko, Aleksandr Arkad'evich, Doctor of Engineering Science, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy President of the Russian Academy of Sciences, Russian Academy of Sciences (14, Leninskii prosp., Moscow, Russia, 119991), Head of Laboratory, Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS (3, Pyzhevsky lane, Moscow, Russia, 119017), Leading Researcher, Russian University of Transport (9-9, Obraztsova St., Moscow, GSP-4, Russia, 127994), e-mail: aam@pran.ru.

Koroleva, Lyudmila Anatolyevna, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor, Saint Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (149, Moskovsky prosp., Saint Petersburg, Russia, 196105), Leading Researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (13, 12th Line V.O., Saint Petersburg, Russia, 199178), e-mail: lyudamil@mail.ru.

Malygin, Igor Gennadievich, Doctor of Engineering Science, Professor, Director, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (13, 12th Line V.O., Saint Petersburg, Russia, 199178), malygin_com@mail.ru.

Tarantsev, Alexander Alekseevich, Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (13, 12th Line V.O., Saint Petersburg, Russia, 199178), e-mail: t__54@mail.ru.

Zaykin, Ruslan Grigorievich, Adjunct, Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (149, Moskovskii prosp., Saint Petersburg, Russia, 196105), e-mail: ruslan-zajkin@yandex.ru.