

Г. А. Кочергин, И. Н. Муратов

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКОВ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

В работе предложен новый риск-ориентированный подход к осуществлению контрольно-надзорной деятельности в сфере регионального экологического контроля. Рассмотрены вопросы построения имитационной модели оценки рисков аварийных разливов нефти, реализуемой в виде цифровой карты региона на основе сочетания методов кластеризации и пространственного анализа данных. В основе анализа лежат данные по аварийности на промысловых нефтепроводах на лицензионных участках Ханты-Мансийского автономного округа за период с 2014 по 2020 годы. Результатом анализа является цифровая карта, опубликованная в сети Интернет с авторизованным доступом и отражающая 5 уровней риска для участков территории исследования.

Ключевые слова: риск-ориентированный подход, имитационная модель, пространственный анализ, методы кластеризации, геоинформационные системы, аварийные разливы нефти.

G. A. Kochergin, I. N. Muratov

SIMULATION MODEL FOR ASSESSING THE RISKS OF ACCIDENTAL OIL SPILLS BASED ON CLUSTER ANALYSIS

The paper proposes a new risk-oriented approach to the implementation of control and supervision activities in the field of regional environmental control. The issues of building a simulation model of oil spill risks assessment, implemented in the form of a digital map of the region based on a combination of clustering methods and spatial data analysis are considered. The analysis is based on data on accidents at field oil pipelines in the license areas of Khanty-Mansi Autonomous Okrug for the period from 2014 to 2020. The result of the analysis is a digital map published on the Internet with authorized access and reflecting 5 levels of risk for the districts of the study area.

Key words: risk-oriented approach, simulation model, spatial analysis, cluster analysis, geoinformation systems, oil spills.

Введение

В связи с необходимостью внедрения риск-ориентированного подхода при осуществлении контрольно-надзорной деятельности региональными органами государственной власти, обусловленной принятием соответствующего федерального закона [1], возникает задача разработки методики для отнесения объектов или субъектов контроля к определенной категории риска. Правительством РФ разработаны общие правила определения категорий рисков [2, 3], которые, тем не менее, не являются универсальными для таких видов контроля, как, например, региональный экологический контроль, где объектом контроля является участок территории, а не юридическое лицо как таковое. Более того, поставленная в сфере регионального экологического контроля задача должна решаться отдельно для каждого субъекта РФ исходя из специфики хозяйственной деятельности, выявленных экологических рисков, а также накопленной информации об экологическом состоянии окружающей среды и зафиксированных негативных процессах или явлениях.

Для Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО), являющегося лидером среди российских регионов по добыче и транспортировке углеводородного сырья, одной из главных экологических проблем является загрязнение земель лесного фонда вследствие аварийного разлива нефти и нефтепродуктов [4]. Огромная территория, на которой ведется интенсивная добыча нефти, и относительно слаборазвитая транспортная инфраструктура требуют разработки новых подходов не только к проведению контрольно-надзорных мероприятий, но и к их планированию. В связи с этим внедрение риск-ориентированного подхода является ключевой задачей, решение которой позволит не только обеспечить экологическую безопасность региона, но и повысит эффективность работы инспекторского состава при осуществлении контрольно-надзорных мероприятий [5].

В качестве инструмента для оценки указанных рисков представляют интерес методические документы [6], регламентирующие оценку риска аварий на магистральных и промысловых нефтепроводах. Согласно упомянутой выше методике, оценка риска аварий – это процесс, используемый для определения вероятности (или частоты) и степени тяжести последствий реализации опасностей аварий для здоровья человека, имущества и (или) окружающей природной среды. Оценка риска включает анализ вероятности (или частоты), анализ последствий и их сочетания. В данной методике используются многолетние данные об авариях для количественного анализа риска аварий на магистральном нефтепроводе. Производится количественная оценка показателей риска аварий для сравнения их со среднестатистическим (фоновым) уровнем риска и установления степени опасности линейных участков и линейных составляющих магистрального нефтепровода.

Для анализа риска аварий на промысловых нефтепроводах также предполагается использование другой методики [7], которая включает идентификацию опасностей, которые могут привести к авариям, и определение вероятностей (частот) возникновения аварий с использованием метода анализа деревьев отказов. Использование многолетних данных об авариях в данной методике не предусмотрено.

По нашему мнению, использование указанных выше методик для анализа риска аварий на магистральных и промысловых нефтепроводах вызывает определенные сложности применительно к территориальным условиям ХМАО, где сеть трубопроводов представляет собой сильно разветвленную структуру (рисунок 1), а их общая протяженность по состоянию на 2019 год составляет более 114 тыс. км [4]. В связи с этим, актуальной является задача оценки рисков аварийных разливов нефти на площадных участках и создание цифровой карты рисков для всей территории региона. Наиболее приемлемым, по нашему мнению, является подход к оценке рисков аварийных разливов нефти на землях лесного фонда, в основе которого лежит процедура кластеризации имеющихся многолетних данных об авариях и создание на ее основе цифровой карты, которая будет отражать степень риска для той или иной территории. В соответствии с действующим законодательством [3] будем выделять 5 категорий риска, которые более подробно рассмотрены ниже.

Исходя из вышесказанного следует, что в настоящее время методические вопросы внедрения риск-ориентированного подхода к осуществлению регионального экологического контроля на территории ХМАО разработаны недостаточно, что является основной причиной невозможности внедрения такого подхода. В связи с этим целью данной работы является изложение методических вопросов разработки имитационной модели оценки рисков аварийных разливов нефти, реализуемой в виде цифровой карты региона на основе сочетания методов кластеризации и пространственного анализа данных. Под риском аварийного разлива нефти мы будем понимать ожидаемую частоту возникновения инцидента на некотором участке территории, рассчитанную на основе имеющихся данных об авариях в прошлом на всей территории анализа. Такой тип анализа рисков, основанный на использовании результатов статистической обработки проявлений опасных событий и процессов в прошлом, в [8] называется апостериорным.

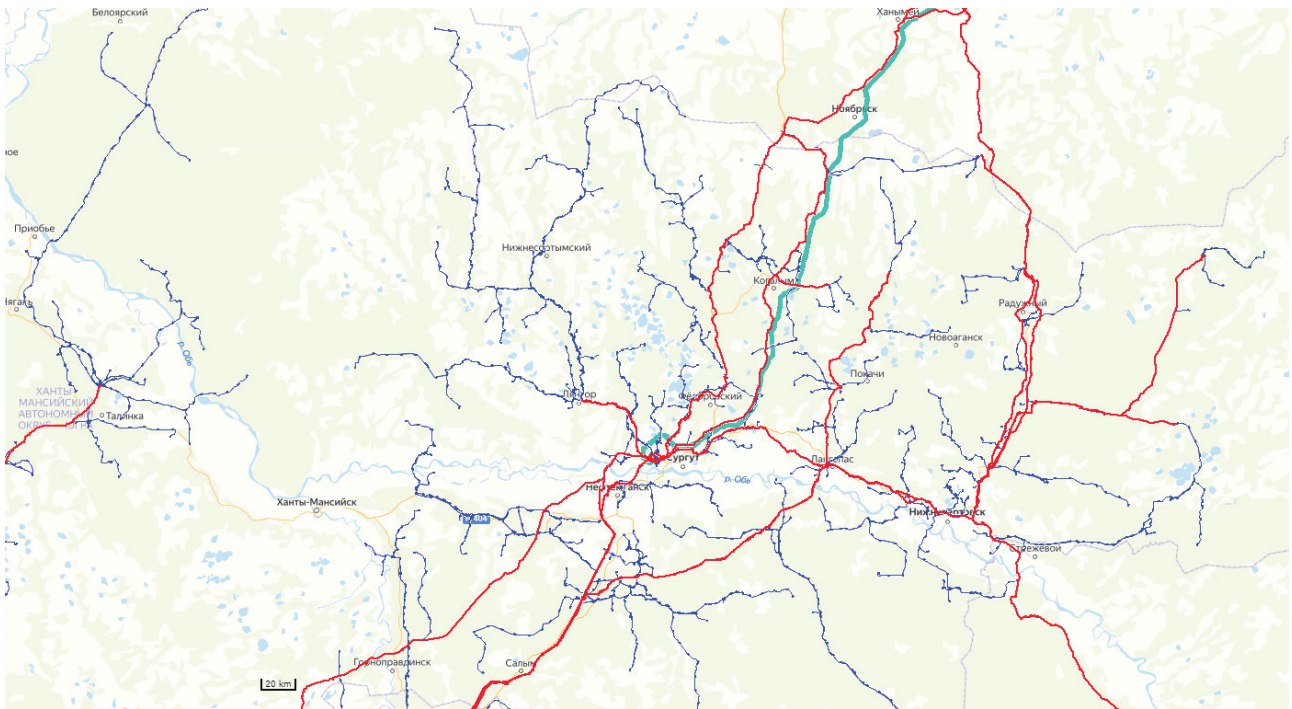


Рисунок 1 – Схема размещения трубопроводов на территории ХМАО:
магистральные – красные линии; промысловые – синие линии

Данные и особенности их обработки и анализа

Для проведения исследований в настоящей работе использовались данные, накопленные в региональной информационной системе «Автоматизированная информационная система контрольно-надзорной деятельности» (АИС КНД), основным пользователем которой является Служба по контролю и надзору в сфере охраны окружающей среды, объектов животного мира и лесных отношений Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (Природнадзор Югры). В качестве исходных данных использовалась выборка информации обо всех произошедших на территории лицензионных участков (ЛУ) авариях на промысловых нефтепроводах за 2014–2020 гг. Для каждого инцидента определены местоположение и дата, что позволяет соотнести эту информацию с границами лицензионных участков и провести пространственный анализ данных об аварийности на участках определенной площади за весь рассматриваемый отрезок времени.

Первоначальный размер выборки, импортированной из АИС КНД, составлял 18 686 записей об авариях за период с 2014 по 2020 гг. Из них пригодными для дальнейшего анализа оказались только 14 744 записи, которые имели корректное описание местоположения аварий. Остальные записи были исключены из дальнейшего анализа ввиду недостаточной их корректности.

Обработка исходной выборки данных производилась с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel, которое позволило сформировать двумерную таблицу объектов, имеющих корректное описание пространственных и атрибутивных данных. Также все расчеты интегральных показателей, используемых в исследовании, проводились в указанном табличном процессоре.

Для кластеризации и пространственного анализа данных применялось специализированное программное обеспечение с открытым исходным кодом – геоинформационная система GeoDA [9], разработанная в Центре науки о пространственных данных Чикагского университета США. Анализ различных ГИС показал, что указанная система, предназначенная для анализа данных путем изучения и моделирования пространственных закономерностей, является

наиболее подходящей для решения нашей задачи. Для отображения табличных данных в геоинформационной системе предварительно было выполнено преобразование табличных данных с координатами мест аварий к пространственному формату.

Создание цифровой карты рисков аварийных разливов нефти в регионе и ее публикация на заключительном этапе анализа проводилась с использованием серверной геоинформационной системы NextGIS Web [10], которая так же относится к классу систем с открытым исходным кодом. Это позволило предоставить доступ к разработанной цифровой карте определенному кругу авторизованных пользователей (сотрудникам Природнадзора Югры) посредством сети Интернет.

Методические вопросы разработки имитационной модели

Рассмотрим методические вопросы построения имитационной модели для оценки рисков аварийных разливов нефти на территории автономного округа в виде цифровой карты, которая реализуется алгоритмическими методами с использованием кластеризации и пространственного анализа. Для создания цифровой карты нами предлагается следующая последовательность этапов обработки и анализа данных:

1. Расчет интегрального показателя на основе аварий, произошедших в границах лицензионных участков за все годы наблюдений, с учетом площади ЛУ и суммарного количества аварий на всех ЛУ по каждой компании.
2. Кластеризация лицензионных участков на 5 классов (по 5 уровням риска) на основе рассчитанных значений интегрального показателя.
3. Разделение ЛУ на элементарные участки меньшей площади, в зависимости от рассчитанного уровня риска.
4. Расчет нового интегрального показателя для элементарных участков с учетом площади участка и количества аварий на соседних участках.
5. Кластеризация элементарных участков на 5 классов (по 5 уровням риска) на основе значений нового интегрального показателя.
6. Создание цифровой карты оценки рисков аварийных разливов нефти на территории автономного округа и публикация результатов анализа.

На первом этапе для каждого лицензионного участка, расположенного на территории автономного округа, был рассчитан интегральный показатель AGSWK, основанный на данных о количестве аварий за все годы и учитывающий площадь ЛУ и усредненное количество аварий на всех ЛУ по каждой компании, с использованием следующей формулы:

$$AGSWK = AGS + \frac{1}{K} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N AGS \times wk_{ij}, \quad (1)$$

где N – количество лицензионных участков на территории ХМАО (423 шт.); K – количество лицензионных участков у соответствующей компании-недропользователя; wk – элементы матрицы соответствия компаний WK, для которой выполняется следующее условие:

$$wk_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если название компании совпадает для } i\text{-го и } j\text{-го ЛУ} \\ 0, & \text{в противоположном случае} \end{cases}, \quad (2)$$

AGS – это показатель количества аварий, определяемый по формуле:

$$AGS = (w_{2020} \times a_{2020} + w_{2019} \times a_{2019} + \dots + w_{2014} \times a_{2014}) \times \frac{1}{S}, \quad (3)$$

где w – весовой коэффициент для соответствующего года; a – количество зафиксированных аварий на лицензионном участке в соответствующем году; S – площадь лицензионного участка.

Весовой коэффициент для соответствующего года w в формуле (3) принимает следующие значения: "1" для 2020 года, "1/2" для 2019 года, "1/4" для 2018 года и так далее до "1/64" для 2014 года. Эти значения выбраны таким образом, чтобы значимость (вес) аварий уменьшалась с увеличением времени давности произошедших аварий, то есть, чем раньше произошли аварии, тем меньше будет их значимость.

Матрица соответствия компаний WK в формуле (1) введена для того, чтобы увеличить значение интегрального показателя для всех лицензионных участков тех компаний, у которых есть участки с высоким количеством выявленных аварий.

На втором этапе на основе рассчитанных по формуле (1) значений интегрального показателя AGSWK все 423 лицензионных участка были разбиты на 5 кластеров с использованием метода кластеризации k-медоидов [11]. Информация о полученных кластерах представлена в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Результаты кластеризации ЛУ

№ кластера	Центр кластера (по показателю AGSWK)	Количество ЛУ в кластере	Уровень риска
1	0,001	357	низкий
2	0,058	18	умеренный
3	0,107	19	средний
4	0,172	17	значительный
5	0,374	12	высокий

Отношение внутрикластерной суммы квадратов расстояний к межкластерной сумме квадратов расстояний для полученных кластеров оказалось равным 0,056. Низкие значения указанного отношения свидетельствуют о высокой компактности элементов в каждом кластере и, вместе с тем, о большой отдаленности кластеров друг от друга, что, в свою очередь, говорит о высоком качестве полученного разбиения.

На третьем этапе было проведено разделение всех лицензионных участков, попавших во 2-5 кластеры, на элементарные участки по следующему правилу: 2 на 2 км для лицензионных участков из 5 кластера, 4 на 4 км – из 4 кластера, 8 на 8 км – из 3 кластера и 16 на 16 км – из 2 кластера. То есть, чем выше определенный на втором этапе уровень риска для лицензионного участка, тем на более мелкие элементарные участки он разделяется. Такое разделение равномерной квадратной сеткой позволит выявить компактные места высокой концентрации аварий на лицензионных участках, что, в свою очередь, позволит с более высокой детализацией определить территории с различными уровнями риска аварийного разлива нефти. Следует отметить, что лицензионные участки, выделенные на втором этапе в кластер с низким уровнем риска, не разделялись на элементарные участки, а, следовательно, не подвергались дальнейшему анализу.

На четвертом этапе было рассчитано значение нового интегрального показателя ASW для каждого выделенного на предыдущем этапе элементарного участка с учетом площади этого участка и среднего количества аварий на соседних участках по следующей формуле:

$$ASW = AS + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N AS \times ws_{ij}, \quad (4)$$

где N – количество соседних участков на пороговом расстоянии (5 км); ws – элементы матрицы близости элементарных участков WS , для которой выполняется следующее условие:

$$ws_{ij} = \begin{cases} 1 - \left| \frac{d_{ij}}{h} \right|, & \text{если } \left| \frac{d_{ij}}{h} \right| < 1 \\ 0, & \text{в противоположном случае} \end{cases}, \quad (5)$$

где d_{ij} – расстояние между центрами элементарных участков i и j ; h – пороговое расстояние (5 км).

AS в формуле (4) является показателем количества аварий, который определяется по формуле:

$$AS = (w_{2020} \times a_{2020} + w_{2019} \times a_{2019} + \dots + w_{2014} \times a_{2014}) \times \frac{1}{S}, \quad (6)$$

где w – весовой коэффициент для соответствующего года; a – количество зафиксированных аварий на элементарном участке в соответствующем году; S – площадь элементарного участка.

Значения весовых коэффициентов для соответствующего года в формуле (6) были выбраны по тому же правилу, что и в формуле (3). Матрица близости элементарных участков WS в формуле (4) введена для того, чтобы увеличить значение интегрального показателя для всех соседних (в радиусе 5 км) элементарных участков с теми, где выявлено большое количество аварий.

На пятом этапе на основе рассчитанных по формуле (4) значений интегрального показателя ASW все элементарные участки были разбиты на 5 кластеров с использованием метода кластеризации k-медоидов. Отношение внутрикластерной суммы квадратов расстояний к межкластерной сумме квадратов расстояний для нового разбиения получилось равным 0,139, что так же говорит о приемлемом качестве кластеризации. Результаты кластеризации элементарных участков приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты кластеризации элементарных участков

№ кластера	Центр кластера (по показателю AGS)	Количество элементарных участков в кластере	Уровень риска
1	0	1747	низкий
2	0,089	586	умеренный
3	0,303	473	средний
4	0,869	334	значительный
5	1,916	197	высокий

На заключительном шестом этапе анализа было проведено пространственное объединение полученных на пятом этапе результатов кластеризации элементарных участков и лицензионных участков, выделенных на втором этапе анализа в кластер с низким уровнем риска. На основе этого был сформирован единый пространственный слой с контурами участков, где для каждого участка был определен номер кластера или уровень риска к которому он относится. В результате была построена и затем опубликована цифровая карта автономного округа с отображением 5 уровней риска аварийного разлива нефти для различных территорий (рисунок 2).

Обсуждение результатов

Для интерпретации полученных результатов рассчитаем количество зафиксированных за весь период аварий для каждого участка рассматриваемой территории, относящейся к одному из 5 выделенных уровней риска. Дополнительно рассчитаем суммарную площадь всех территорий для каждого уровня риска и концентрацию аварий на 100 квадратных километров. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

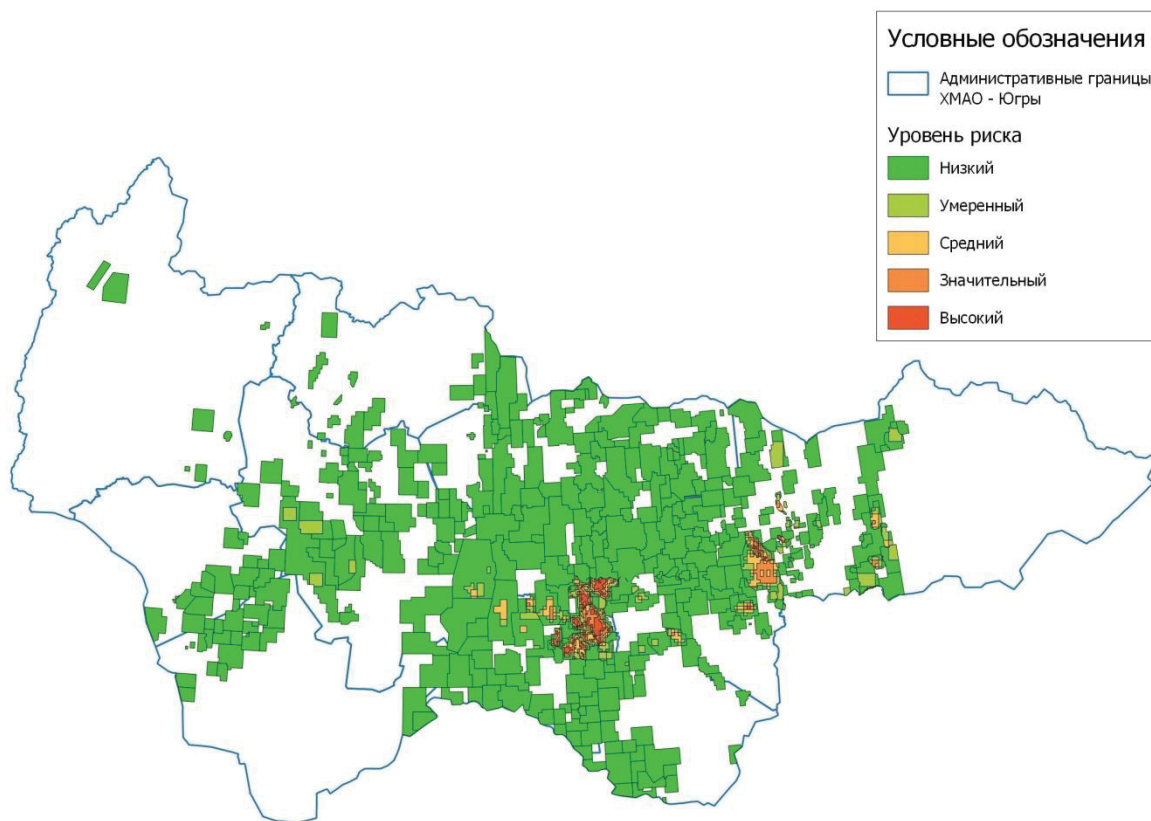


Рисунок 2 – Цифровая карта оценки рисков аварийных разливов нефти на территории Ханты-Мансийского автономного округа

Таблица 3 – Показатели уровней риска аварий

Уровень риска	Количество аварий, шт.	Площадь территорий, кв. км	Концентрация аварий, шт./ 100 кв. км
Низкий	1 390	174 653	0,8
Умеренный	1 321	6 593	20,0
Средний	2 218	2 842	78,0
Значительный	3 830	1 829	209,4
Высокий	5 985	785	762,4
Итого	14 744	186 703	—

Из таблицы 3 видно, что для участков с высоким уровнем риска характерна наибольшая концентрация аварий – 762 на 100 квадратных километров, и с уменьшением степени риска концентрация аварий падает примерно в 3–4 раза. Участки территории с низким уровнем риска характеризуются минимальным значением концентрации аварий на уровне менее 1 аварии на 100 квадратных километров за все время наблюдений. Таким образом, построенная в результате анализа цифровая карта оценки рисков аварийного разлива нефти позволяет разделить территорию автономного округа на различные зоны, которые требуют различного подхода к организации и частоте контрольно-надзорных мероприятий в сфере регионального экологического контроля. Однако, данные вопросы уже выходят за рамки изложенного в работе исследования.

Заключение

Представлена методика, основанная на совместном использовании методов кластеризации и пространственного анализа данных, которая позволяет построить имитационную модель оценки рисков аварийных разливов нефти в виде цифровой карты региона. Отличитель-

ной особенностью предложенной методики является учет не только количественной информации о выявленных авариях, но и включение в анализ пространственной составляющей о местоположении аварий, а также дополнительный учет таких факторов, как принадлежность участков с большим количеством аварий одной и той же компании и пространственная близость таких участков.

Проведенный анализ данных об аварийности на трубопроводных системах Ханты-Мансийского автономного округа за 2014-2020 гг. позволил построить цифровую карту региона, разделяющую всю площадь лицензионных участков на зоны с различным уровнем риска возникновения аварийного разлива нефти. Установлено, что суммарная площадь территорий с высоким риском, расположенных в Нефтеюганском и Нижневартовском районах автономного округа, составляет всего 785 квадратных километров, и при этом вмещает в себе более 40% всех зафиксированных инцидентов.

В связи с высокой важностью задачи внедрения риск-ориентированного подхода при осуществлении регионального экологического контроля данная статья будет способствовать применению такого подхода в Ханты-Мансийском автономном округе. А предложенное в работе разделение территории автономного округа на зоны различного уровня риска позволит оптимизировать финансовые и временные ресурсы для обеспечения и надлежащего планирования контрольно-надзорных мероприятий ответственными органами власти региона.

Благодарности

Работа выполнялась в рамках государственного задания Департамента информационных технологий и цифрового развития ХМАО-Югры на 2021 год. Данные предоставлены Службой по контролю и надзору в сфере охраны окружающей среды, объектов животного мира и лесных отношений ХМАО-Югры.

Литература

1. Российская Федерация. Законы. О внесении изменений в Федеральный закон «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля» : Федеральный закон № 246-ФЗ : от 13.07.2015 : [принят Государственной Думой 1 июля 2015 года]. – Текст : электронный // КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_182622 (дата обращения: 15.01.2021).
2. О применении риск-ориентированного подхода при организации отдельных видов государственного контроля (надзора) и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации (вместе с "Правилами отнесения деятельности юридических лиц и индивидуальных предпринимателей и (или) используемых ими производственных объектов к определенной категории риска или определенному классу (категории) опасности") : постановление Правительства РФ № 806 : от 17.08.2016 : редакция от 05.11.2020. – Текст : электронный // КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_203819/ (дата обращения: 15.01.2021).
3. О критериях отнесения производственных объектов, используемых юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к определенной категории риска для регионального государственного экологического надзора и об особенностях осуществления указанного надзора : постановление Правительства РФ № 1410 : от 22.11.2017. – Текст : электронный // КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_283389/ (дата обращения: 15.01.2021).
4. Доклад об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре в 2019 году. – Текст : электронный // Служба по контролю и надзору в сфере охраны окружающей среды, объектов животного мира и лесных отношений Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. – URL: <https://prirodnadzor.admhmao.ru/doklady-i-otchyety/doklad-ob>

ekologicheskoy-situatsii-v-khanty-mansiyskom-avtonomnom-okruge-yugre/4372185/2019-god-
(дата обращения: 15.01.2021).

5. Комов, В. Э. Обоснование повышения эффективности деятельности контрольно-надзорной деятельности на региональном уровне / В. Э. Комов, А. И. Кабалинский. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Экономические и юридические науки. – 2017. – № 1-1. – С. 159–164.

6. Об утверждении Руководства по безопасности “Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов : Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 228 : от 17.06.2016. – Текст : электронный // КонсультантПлюс. – URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=OTN&n=18466&demo=1> (дата обращения: 15.01.2021).

7. Методика анализа риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазодобычи : руководство по безопасности : утверждена Приказом Ростехнадзора № 317 от 17.08.2015. – Текст : электронный // КонсультантПлюс. – URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=OTN&n=10619&demo=1> (дата обращения: 15.01.2021).

8. Медведева, С. А. Экологический риск. Общие понятия, методы оценки / С. А. Медведева. – Текст : непосредственный // XXI век. Техносферная безопасность. – 2016. – № 1. – С. 67–81.

9. GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis : сайт. – URL: <http://geodacenter.github.io/> (дата обращения: 15.01.2021). – Текст : электронный.

10. NextGIS Web : сайт. – URL: <https://nextgis.ru/nextgis-web/> (дата обращения: 15.01.2021). – Текст : электронный.

11. Kaufman, L. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis / L. Kaufman, P. Rousseeuw. – New York : John Wiley, 2005. – 342 p.