

Научная статья  
УДК 629.039.58  
doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.96.50.013

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РОЗЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ПОТЕНЦИАЛЬНО-ОПАСНОМ ОБЪЕКТЕ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ СРЕДСТВАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Ярослав Владимирович Гребнев<sup>1,2</sup>,  
Александр Константинович Москалев<sup>1</sup>,  
Динара Ильдаровна Шагидулина<sup>1</sup>,  
Александр Викторович Антонов<sup>2,3</sup>,  
Дмитрий Владимирович Иванов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Главное управление МЧС России по Красноярскому краю, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

**Автор ответственный за переписку:** Ярослав Владимирович Гребнев,  
yaroslav.grebnev@mail.com

**Аннотация.** Активное освоение Арктики, которое стало трендом последнего десятилетия стало большим вызовом для хрупкой экосистемы Арктики и требует должного контроля за технологическими процессами на предприятиях, поскольку за последние два года на территории Арктики произошел ряд аварий связанных с разливом нефтепродуктов на почву и водоемы расположенных в этих районах. Применимых мер по обеспечению техносферной безопасности в настоящее время недостаточно, о чем свидетельствуют участвовавшие аварийные ситуации и требуется применение современных технологий мониторинга и прогнозирования рисков в целях корректировки планов действия при возникновении ЧС и расчета требуемых сил и средств. Моделирование разлива нефти и нефтепродуктов проводится в целях проведения превентивных мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций. Методики оценки площади разлива нефтепродуктов, применяемые в настоящее время, особенно в арктической зоне, имеют ряд ограничений. В настоящей работе выполнено моделирование процесса разлива нефтепродуктов в целях для расчета распределения концентрации загрязняющих веществ и нейросетевое прогнозирование площади загрязнения вплоть до момента ее ликвидации. Для моделирования аварийной ситуации был программный продукт PHOENICS и методика нейросетевого прогнозирования с использованием библиотеки Scikit-Learn на языке программирования python. Результаты моделирования соотносились с данными, полученными при анализе аварии, возникшей из-за разгерметизации трубопровода при перекачке нефти с судна в резервуарный парк на реке Хатанга арктической зоны Красноярского края.

**Ключевые слова:** чрезвычайная ситуация, нефть, риск, угроза, имитационное моделирование, прогнозирование, нейросетевая модель

**Для цитирования:** Гребнев Я.В., Москалев А.К., Шагидулина Д.И., Антонов А.В., Иванов Д.В. Разработка модели разлива нефтепродуктов на потенциально-опасном объекте в арктической зоне Красноярского края средствами имитационного моделирования// Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 1 (24). С. 132-139. <https://dx.doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2022.96.50.013>.

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке АНО «Экспертный Центр ПОРА», проект № 233-Г.

## DEVELOPMENT OF AN OIL SPILL MODEL AT A POTENTIALLY HAZARDOUS FACILITY IN THE ARCTIC ZONE OF THE KRASNOYARSK TERRITORY BY MEANS OF SIMULATION MODELING

*Yaroslav V. Grebnev*<sup>1,2</sup>;  
*Alexander K. Moskalev*<sup>1</sup>,  
*Dinara I. Shagidulina*<sup>1</sup>,  
*Alexander V. Antonov*<sup>2,3</sup>,  
*Dmitry V. Ivanov*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>2</sup>*Russian Emergencies Ministry for the Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>3</sup>*Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia*

**Corresponding author:** *Yaroslav V. Grebnev, yaroslav.grebnev@mail.com*

**Abstract.** The active development of the Arctic, which has become a trend of the last decade, has become a big challenge for the fragile ecosystem of the Arctic and requires proper control over technological processes at enterprises, since over the past two years a number of accidents have occurred in the Arctic associated with spilling oil products on the soil and water bodies located in these areas. Applicable measures to ensure technosphere safety are currently insufficient, as evidenced by the increasing number of emergencies and the use of modern technologies for monitoring and forecasting risks is required in order to adjust action plans in the event of an emergency and calculate the required forces and means. Modeling of oil and oil products spills is carried out in order to carry out preventive measures to prevent emergency situations. Methods for estimating the area of oil spills currently used, especially in the Arctic zone, have a number of limitations. In this work, the modeling of the process of bottling oil products was carried out in order to calculate the distribution of the concentration of pollutants and neural network prediction of the area of pollution up to the moment of its liquidation. To simulate an emergency, there was the PHOENICS software product and a neural network forecasting technique using the Scikit-Learn library in the Python programming language. The simulation results were correlated with the data obtained in the analysis of an accident that occurred due to a pipeline depressurization when pumping oil from a vessel to a tank farm on the Khatanga River in the Arctic zone of the Krasnoyarsk Territory.

**Key words:** emergency, oil, risk, threat, simulation, forecasting, neural network model

**For citation:** Grebnev Y.V., Moskalev A.K., Shagidulina D.I., Antonov A.V., Ivanov D.V. Development of an oil spill model at a potentially hazardous facility in the Arctic zone of the Krasnoyarsk Territory by means of simulation modeling// Siberian Fire and Rescue Bulletin 2022. № 1 (24). С. 132-139. <https://dx.doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2022.96.50.013>.

**Acknowledgments:** the work was supported by ANO Expert Center PORA, project No. 233-G.

### Введение

Арктическая зона, это уникальная и хрупкая экосистема и среда обитания многих редких представителей флоры и фауны. Однако эта территория также является территориями, богатой природными ресурсами на которой ведется активная работа по геологоразведке и промышленной добычи ресурсов, что увеличивает техногенную нагрузку на экосистему и риски чрезвычайных ситуаций. Одним из самых опасных и распространенных загрязняющих веществ для экосистемы Севера, является нефтепродукты, используемые для отопления и работы транспортной и промышленной техники. Несмотря на все предпринимаемые меры в области промышленной безопасности, аварии продолжают происходить, их последствия приносят существенный вред окружающей среде и здоровью людей. Так в сентябре 2020 года при выполнении обхода трассы технологического трубопровода при осуществлении перекачки нефти с судна в резервуарный парк произошёл порыв нефтепровода, в результате которого

произошёл, разлив нефти на берег реки Хатанга. В полной мере оценить последствия подобных аварий является достаточно трудной проблемой, поскольку ликвидация последствий аварийных разливов является достаточно продолжительным мероприятием и составляет период от нескольких дней до нескольких лет в зависимости от объема разлитых нефтепродуктов. Следует отметить, что этот процесс требует применения технологий по рекультивации и экологической реабилитации.

Проблемы регулирования природопользования загрязненных земель и водоемов рассматривались в работах авторов [1;2;3]. Вопросы регулирования рационального природопользования и экологии освещались в работах авторов [4;5]. Однако в целом задача оценки рисков чрезвычайных ситуаций в арктических территориях далека от завершения. Вновь возникающие проблемы ставят новые задачи для исследователей арктической зоны.

В этой связи актуальность использования современных методов прогнозирования и математического моделирования процесса распространения техногенных жидкостей в зонах вечной мерзлоты не вызывает сомнения. Метод нейросетевого моделирования, который позволяет на основе большого объема данных выявлять закономерности и строить зависимости, позволяющие производить своевременное моделирование природных и техногенных процессов и явлений, является предпочтительным [6]. Основной сложностью применения нейросетевого прогнозирования является качественная подготовка архивных данных [7;8].

В работе нами была поставлена цель разработка модели прогнозирования разлива нефтепродуктов средствами нейросетевого прогнозирования. Соотнесение результатов моделирования будет соотнесено с данными, полученными при анализе последствий аварии, описанной ранее.

## Материалы и методы

Моделирование производилось по средствам применения программных продуктов PHOENICS [9] и разработанной модели, написанной на python с использованием библиотеки scikit-learn [10].

Входные параметры были подобраны эмпирическим путем. Для обучения нейронной сети на основе данных Главного управления МЧС России по Красноярскому краю создан нормализованный массив с параметрами, содержащими данные о нефтяном разливе, произошедшем в районе населенного пункта Хатанга.

Разработка в программе PHOENICS модели распространения нефтепродуктов в водоеме представляет следующий алгоритм:

Первый этап: определение геометрических и физических параметров области водоема: длина по  $x_1$  – 1000 м, ширина по  $x_2$  – 600 м, глубина по  $x_3$  – 7 м; плотность воды  $\rho_1 = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;

Второй этап: определение внешних факторов, которые влияют на распространение веществ: температура воды  $t_b = 8^\circ\text{C}$ . Течение реки в первом случае описывается скоростью –  $v_1 = 1,5$  м/с, а во втором  $v_2 = 2$  м/с.

Третий этап - настройка плотности сетки и размера контрольных объемов и устанавливается время счета задачи  $t = 10$  мин, что соответствует времени бездействия персонала на возникшую аварийную ситуацию.

Четвертый этап - расчет концентрации нефтепродуктов и скоростей.

Задача нейросетевого прогнозирования риска сводится к обучению и тестированию сети с заранее заданными характеристиками.

Исследование параметров, влияющих на размеры площади разлива нефтепродуктов и направление движения нефтяного пятна, позволило выделить 14 основных факторов, которые составили векторы признаки для моделирования:

1. время года на момент разлива;
2. объем нефтепродукта, который был распространён;
3. наличие и вид защитных сооружений на пути распространения продукта;

4. рельеф местности;
5. подстилающая поверхность (грунты) места разлива;
6. наличие растительности: древесной, кустарниковой, травянистой;
7. попадание разлитых нефтепродуктов в водотоки;
8. время локализации разлива;
9. количество осадков;
10. масса нефти, диспергированной в воду, тонн;
11. скорость ветра, м/с;
12. скорость течения воды, м/с;
13. тип нефтепродукта;
14. направление ветра.

Нейросетевое моделирование производилось по средствам применения многослойной нейронной сети с сигмоидной активационной функцией вида:

$$f(x) = \frac{x}{c+|x|} \quad (1)$$

где  $c$  - характеристика нейрона;  
 $x$  – набор входных параметров.

Алгоритм обучения нейросети представлял следующий вид (рис. 1):

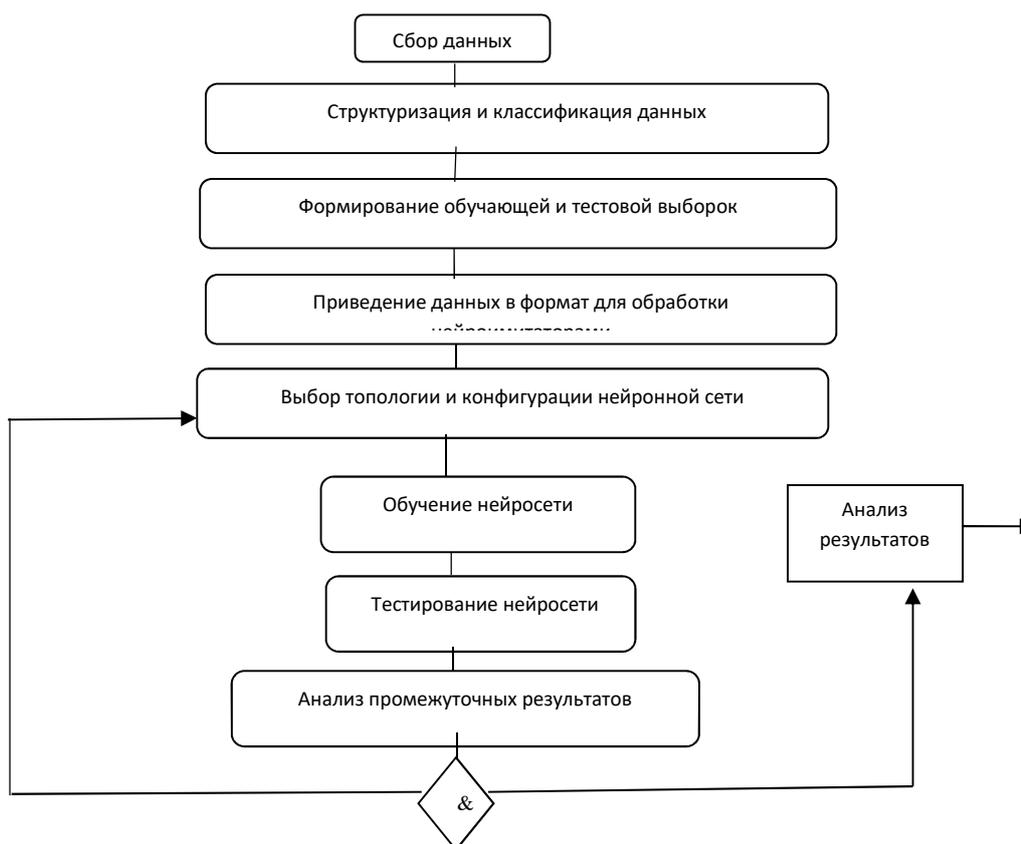


Рис. 1. Алгоритм обучения нейросети

(& - знак «если»: повторный процесс возникает, если процент достоверности выдаваемых результатов низок, и процесс выходит на анализ, если процент достоверности выдаваемых результатов достаточен).

Размерность векторов признаков, отмеченных выше была установлена эмпирическим путем, составляла четырнадцать. При вычислении использована многослойная нейронная сеть

с 14 слоями и числом нейронов скрытых слоев равным 204, которая показывает хорошие результаты на практике. Процент достоверности получаемых результатов был в пределах 60-72%.

### Результаты и обсуждение

В правом верхнем углу рисунка 2 карты участка местности представлена обобщенная модель развития обстановки после аварийного разлива нефтепродуктов.



Рис. 2. Изображение обобщенной модели распространения нефтепродуктов (правый угол рисунка), совмещенное с картой местности прорыва нефтепродуктов.

Решение задачи распространения нефтепродуктов в реке решалась численными методами. Результаты решений верифицировались методом уменьшения размеров контрольных объемов. Визуализация результатов моделирования представлялись в виде двухмерных изображений по осям  $x_1x_3$  или  $x_1x_2$ .

На рисунке 3 представлены распределения концентрации нефтепродуктов в реке Хатанга. Самые большие значения концентрации  $C_1 = 0,948; 0,907; 0,836$  были получены в непосредственной близости от места попадания нефтепродуктов в водоем, что отображено на рисунке красным цветом. В зависимости от времени попадания в водоем и переноса нефтепродуктов по реке, происходит эмульгирование с водой нефтяного пятна и распространение его с течением, что соответственно уменьшает концентрацию нефтепродуктов.

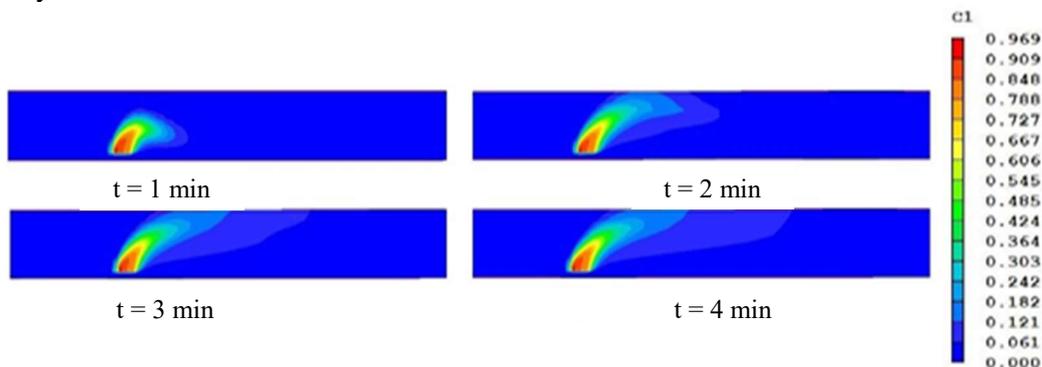


Рис. 3. Распределение концентрации  $C_1$  в разные моменты времени (вид сбоку)

Вид сверху на поверхность воды представлен на рисунке 4, в зависимости от распространения нефтяного пятна в водной поверхности, нефтяное пятно приобретало вид

формы подковы, поскольку, поток нефтепродуктов в силу своей высокой плотности тормозит течение реки.

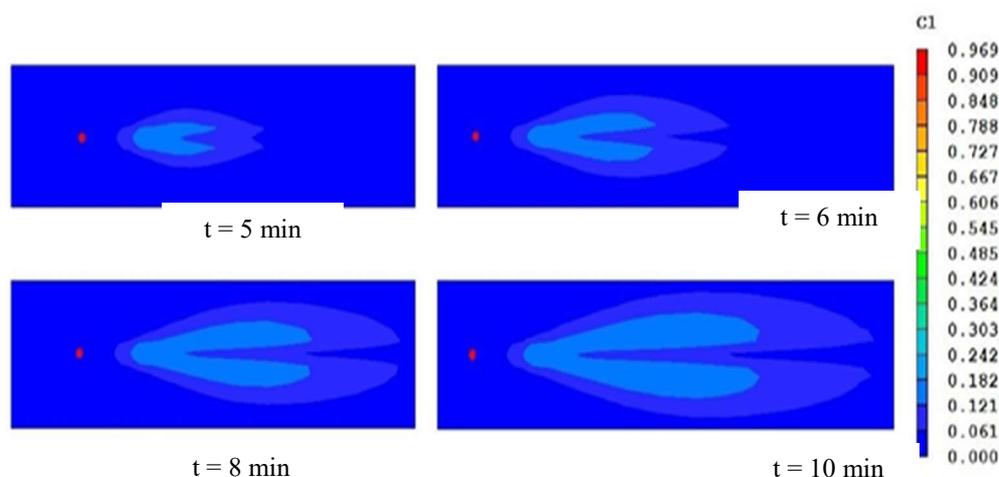


Рис. 4. Распределение концентрации  $C_1$  нефтяного потока на поверхности воды в различные моменты времени (вид сверху).

Количество нефтепродуктов, вытекшей за 10 минут пока персонал не реагировал на возникшую аварийную ситуацию:

$$m = C_1 \cdot w \cdot S \cdot t \quad (2)$$

где  $m$  – количество нефтепродуктов, кг;  $C_1$  – концентрация нефтепродуктов;  $w$  – скорость истечения нефтепродуктов;  $S$  – площадь свища;  $t$  – время истечения.

Для параметров конкретной аварии количество нефти  $m_1$  составила 563 кг.

При этом нефтяные эмульсии в дальнейшем перенесутся течением реки на значительное расстояние. В соответствии с проведенными расчетами унесенные течением нефтяные пятна, эмульсированные с водой, на поверхности реки можно будет через 10 км. от места разлива.

Следует отметить, что моделированная ситуация, подразумевает непрерывный поток нефтепродуктов в водоем, однако если рассмотреть реальную ситуацию, то нефтепродукты вытекают из резервуара, в результате разгерметизации порционно, соответственно таким же образом попадает в водоем. Между данной моделью и реальностью есть небольшие расхождения. Проведение дополнительных экспериментов в данной области представляет большой интерес и одновременно является не тривиальной задачей.

Решение второй поставленной задачи, а именно нейросетевое прогнозирование площади нефтяного пятна производился с применением методики, описанной ранее в разделе материалы и методы. Используя данные ежедневного мониторинга распространения нефтепродуктов, данные о площади загрязнения и другие параметры, описанные выше, нами выполнено обучение нейронной сети и моделирование развития ситуации. Полученные вычислительные результаты сравнивались с реальными, полученными из мониторинга обстановки в районе чрезвычайной ситуации.

Сравнение результатов, полученных с использованием нейронной сети и реальные значения площади нефтяного пятна представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Данные о реальной и расчетной площади нефтяного пятна**

Дата	Площадь фактическая с нарастающим итогом, м <sup>2</sup>	Площадь расчетная с нарастающим итогом, м <sup>2</sup>	Отклонение, м <sup>2</sup>
29.09.2020	1800	2100	300
30.09.2020	3700	3900	200
01.10.2020	4400	4600	200
02.10.2020	4000	5200	-1200
03.10.2020	2100	3000	-900
04.10.2020	1200	2100	-800
05.10.2020	300	500	-200

Нефтепродукты, находясь на поверхности воды растекаются медленно, но быстро обводняются, теряя плавучесть и их плотность становится близкой к  $1 \text{ г/см}^3$ . Прогнозирование количественной оценки затопляемого нефтепродукта является довольно сложной задачей, так как она в большой степени зависит от местных условий (температуры воды, количества взвесей в воде и так далее). Учитывая мутность речной воды, наличие большого количества взвесей, следует ожидать частичного затопления разлитого нефтепродукта уже через несколько часов после разлива. После аварии в течении 6 часов нефтепродукт свободно разливался по водной поверхности вниз по течению в сторону стационарных боновых заграждений, установленных после аварийного разлива, в результате чего произошло загрязнение водной поверхности в плоть до боновых заграждений. Расчетная площадь пятна разлива на воде составила  $5200 \text{ м}^2$ . Использование боновых заграждений и сорбентов, отразилась результатов, полученных при моделировании средствами нейросетевого прогнозирования, поскольку фактически спрогнозировать время применения и количество боновых заграждений и сорбирующих веществ, отдельная сложная задача, которая численным методом довольно сложно оценить. Фактически, при скоплении нефтепродукта у бонов, площадь разлива была уменьшена, также произошло частичное загрязнение береговой полосы. Средняя толщина слоя разлившегося нефтепродукта равна  $0,002 \text{ м}$ .

Технологии ликвидации аварийных ситуаций должны учитывать: примерное количество и основные свойства нефтепродуктов; особенности территорий (рельеф, грунты, растительность); характеристику нефтепродуктов и условия их распространения; влияние гидрометеорологических условий; меры безопасности при проведении операций по ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов; характеристики технических средств для локализации разливов нефтепродуктов и методы локализации; характеристики технических средств для сбора нефтепродуктов, нефтезагрязнённого мусора, почвы, методы очистки территорий; особенности ликвидации разливов нефтепродуктов зимой; особенности ликвидации разливов нефтепродуктов сорбирующими материалами и химическими препаратами.

## **Заключение**

В связи с износом оборудования и недостаточным контролем, одним из самых вероятных и опасных аварийных ситуаций на территории Арктической зоны Красноярского края остается разлив нефтепродуктов при авариях нефтеналивных танкеров или при аварийном разливе нефти на любом из судов, разгерметизацию магистрального нефтепровода в результате механических повреждений или коррозии, разгерметизацию резервуаров с топливом нефтепровода в результате механических повреждений или коррозии.

В работе была произведена апробация метода моделирования и нейросетевого прогнозирования реальной аварийной ситуации, возникшей в результате разгерметизации трубопровода в населенном пункте, находящемся в арктической зоне Красноярского края. Выставление боновых заграждений и применение сорбентов отразилось в результатах прогнозирования на основе нейросетевого моделирования в виде расхождения с реальными данными. В дальнейшем при поступлении корректирующей информации результаты прогнозирования ситуации восстановились. Особенность ликвидации последствий аварий на Севере с ее более длительными сроками, финансовоёмкостью требуют привлечения различным методов цифровизации и в этом плане использование нейросетевого моделирования предполагается обоснованным.

## **Список источников**

1. Москвичёв В.В., Бычков И.В., Потапов В.П., Тасейко О.В., Шокин Ю.И. Информационная система территориального управления рисками развития и безопасностью // Вестник РАН, 2017. – том 87, №8. – с. 696-705.

2. Медведева О., Соловьева С. Методика стоимостной оценки ущерба, причиняемого загрязнением атмосферного воздуха / О. Медведева, С. Соловьева // Вопросы оценки. – 2016. – № 4 (86). – С. 2–6.
3. Купцов А. И., Гимранов Ф. М. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования интенсивности испарения аварийной жидкости с поверхности пролива // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19, № 24. С. 113-116.
4. Москвичёв В.В., Ничепорчук В.В., Потапов В.П., Тасейко О.В., Фалеев М.И. Информационное обеспечение мониторинга и рисков развития социально-природно-техногенных систем // Проблемы анализа риска. – 2018. – Т.15. – №2. – С. 56-77.
5. Grebnev Y. V., Moskalev A. K., Vershkov A. V., Gazizulina A. Yu. The practice of connectionist model for predicting forest fires in the Arctic zones of the Krasnoyarsk Territory // International Journal of System Assurance Engineering and Management. 2019. No 5. Pp. 1-9.
6. Хрулькевич А. Л., Гребнев Я. В., Овсяник А. И. Модель оценки влияния рассеяния хлора при его аварийных выбросах в атмосферу на потенциально-опасном объекте г. Красноярск // Технологии техносферной безопасности. – 2021. – Вып. 4 (94). – С. 105-116.
7. Нейроинформатика / А. Н. Горбань [и др.]. — Новосибирск : Наука, СО РАН, 1998.- 296 с.
8. Гребнев Я. В., Яровой А. В. Мониторинг и прогнозирование паводков на территории красноярского края использованием нейросетевых алгоритмов // сибирский пожарно-спасательный вестник. 2018. № 3 (10). С. 13-16.
9. Official website of Phoenix software [Электронныйресурс] URL: <http://www.cham.co.uk/phoenics.php>
10. Python software [Электронныйресурс] URL: <https://www.python.org/>

#### **Информация об авторах**

А.К. Москалев - кандидат физико-математических наук

А.В. Антонов - кандидат технических наук

#### **Information about the author**

A.K. Moskalev - Ph.D. of Physico-mathematical Sciences

A.V. Antonov - Ph.D. of Engineering Sciences

Статья поступила в редакция 24.02.2021; одобрена после рецензирования 17.03.2022; принята к публикации 21.03.2022.

The article was submitted 24.02.2021, approved after reviewing 17.03.2022, accepted for publication 21.03.2022.