

## Анализ устойчивости техносферы арктических территорий Красноярского края с использованием вероятностно-графических моделей

В. В. Москвичев<sup>1,2</sup>, У. С. Постникова<sup>1,3,\*</sup>, О. В. Тасейко<sup>1,3</sup>, И. С. Ефремова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 660049, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнёва, 660037, Красноярск, Россия

\*Контактный автор: Постникова Ульяна Сергеевна, e-mail: [ulyana-ivanova@inbox.ru](mailto:ulyana-ivanova@inbox.ru)

Поступила 30 марта 2023 г., доработана 04 мая 2023 г., принята в печать 11 мая 2023 г.

Представлен подробный анализ факторов опасности, возникающих в техносфере и влияющих на устойчивое развитие территорий Крайнего Севера и Арктической зоны Красноярского края, с учетом природно-климатических особенностей. Даны общая характеристика и оценка состояния промышленной инфраструктуры, приведены данные по аварийности объектов техносферы. На основе байесовских сетей предложена методика оценки вероятности возникновения опасных техногенных событий и выполнены оценки техногенного риска Арктической зоны Красноярского края.

*Ключевые слова:* социально-природно-техногенная система, устойчивое развитие, Арктическая зона, байесовские сети.

*Цитирование:* Москвичев В.В., Постникова У.С., Тасейко О.В., Ефремова И.С. Анализ устойчивости техносферы арктических территорий Красноярского края с использованием вероятностно-графических моделей. Вычислительные технологии. 2023; 28(4):45–56. DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.005.

### Введение

Территории Арктической зоны и Крайнего Севера характеризуются экстремальными природно-климатическими условиями (специфика светового и температурного режимов, вечномерзлые грунты, частое повторение опасных метеорологических явлений и др.), которые оказывают негативное воздействие на здоровье населения, увеличивают энергоёмкость промышленного производства, затраты на содержание инженерной инфраструктуры, риск возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций (ЧС). Проблема устойчивого развития арктических территорий связана с возникновением целого ряда природно-техногенных катастрофических процессов и их высокой чувствительностью к антропогенным воздействиям. Это предъявляет особые требования к методам и способам ведения хозяйственной деятельности, если учитывать тот факт, что указанные территории имеют огромный потенциал промышленного развития и формирования транспортно-логистического комплекса.

В Стратегиях развития Арктической зоны и Сибирского федерального округа Российской Федерации на период до 2035 г. с позиции обеспечения национальной безопасности одними из ключевых факторов, влияющих на социально-экономическое развитие территории, отмечаются климатические изменения, способствующие возникновению как новых экономических возможностей, так и рисков для хозяйственной деятельности и окружающей среды [1, 2]. В этих условиях вопросы социально-природно-техногенной безопасности приобретают первостепенное значение, поскольку именно они определяют перспективы развития территорий, что придает безусловную актуальность исследованиям.

Анализ устойчивости объектов техносферы представлен для Арктической зоны крупного промышленного субъекта — Красноярского края, включающего все территории Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района, северной части Туруханского района, Эвенкийского муниципального района и городской округ Норильск [3]. Несмотря на неблагоприятные географо-климатические условия северных и арктических территорий Красноярского края, на них осуществляется эксплуатация объектов, являющихся источниками высокой техногенной нагрузки и опасности. Это пожаро- и взрывоопасные объекты, транспортные системы, гидродинамические опасные объекты, системы жизнеобеспечения, радиационно и химически опасные объекты (РОО и ХОО) и др. Оценку устойчивости территории к неблагоприятным природным и антропогенным факторам целесообразно проводить на основе концепции социально-природно-техногенной (С-П-Т) системы, которая представляется единым комплексом взаимосвязанных элементов социальной, экономической и техносферы и характеризуется наличием рисков развития и функционирования [3].

## **1. Характеристика Арктической зоны Красноярского края (климатические особенности, промышленная инфраструктура, факторы опасности)**

Арктическая зона Красноярского края имеет особенности, отражающиеся на его экономическом и социальном развитии. Климат здесь крайне суров. Средняя температура января составляет  $-32$  °С, июля — от  $+2$  до  $+13$  °С. Снежный покров лежит 8–9 месяцев в году, осадков выпадает 110–350 мм в год. На территории несколько природно-климатических зон: от северной тайги до полярных пустынь, единственных в мире, расположенных на материке. Ландшафт представлен арктической пустыней, тундрой и лесотундрой, значительную часть территории занимают ледники и вечная мерзлота (до 46.2 % от общей площади Красноярского края) [4].

На территории осуществляется активное развитие промышленного комплекса, который включает: топливную (нефтегазовую), металлургическую, пищевую промышленность, производство и распределение электроэнергии, газа и воды. Наибольшую долю в объеме отгруженной продукции занимает добыча полезных ископаемых. Перспективы дальнейшего освоения Арктической зоны Красноярского края базируются на создании региональной транспортной и энергетической инфраструктуры и формировании высокотехнологичных и конкурентоспособных территориальных кластеров. Ключевыми инвестиционными проектами развития региона являются [5]:

- создание сети широтных и меридиональных железных дорог (ведется поэтапное строительство участков железнодорожной магистрали);
- развитие инфраструктуры Северного морского пути;

- создание нового крупного горно-металлургического комплекса в Норильском промышленном районе (Проект “Южный кластер” предполагает развитие горно-добывающих мощностей и строительство новой Норильский обогатительной фабрики);
- освоение Усть-Енисейской группы нефтегазовых месторождений (разработка Пайяхского и Северо-Пайяхского месторождений, в дальнейшем — Байкаловского и Озерного месторождений);
- газификация Красноярской агломерации на основе ресурсов попутного газа Эвенкии;
- реновация ЖКХ Норильской агломерации (жилищный фонд Норильска находится в критическом состоянии, строительство нового жилья в городе практически прекратилось более 20 лет назад, а большинство домов, построенных ранее, пришло в негодность);
- развитие арктического и северного туризма.

Реализация представленных проектов невозможна без использования инновационных методов, применения новейших экологически, социально сбалансированных технологий с учетом результатов анализа опасностей и рисков развития.

Основная техногенная нагрузка обусловлена эксплуатацией объектов техносферы.

1. *Системы транспорта.* Возникновение ЧС и происшествий связано главным образом с водным и воздушным транспортом. Это аварии на судах с ядерными энергетическими установками, аварии и пожары на морских судах на трассе Северного морского пути, речных судах в акватории Дудинского морского порта и по трассе движения судов Игарка – Диксон. Аэропорты, аэро- и вертодромы также являются объектами повышенного риска возникновения ЧС (крушение воздушных судов, нештатные ситуации при взлете/посадке).
2. *Промышленные объекты.* Значительную опасность представляют пожаро- и взрывоопасные объекты (ПВОО) газовой промышленности (магистральные трубопроводы, газораспределительные станции, газовые промыслы), а также объекты хранения горючесмазочных материалов и взрывчатых веществ. Месторождения и технологические объекты нефтегазовой отрасли локализованы на территориях Таймырского Долгано-Ненецкого, Туруханского и Эвенкийского муниципальных районов. Основная опасность, связанная с возникновением аварий на химически опасных объектах, сосредоточена в городском округе Норильск на предприятиях Горно-металлургической компании “Норильский никель”. В период зимней навигации ежегодно в портах Арктической зоны Красноярского края работают ледоколы с ядерными энергетическими установками на борту. В случае наступления аварийной ситуации радиационные последствия для населения могут быть значительными, так как формирующийся наземный след шлейфа может охватывать большие территории. В Арктической зоне отсутствуют капитальные гидротехнические сооружения, разрушение которых может привести к образованию зон катастрофического затопления. Эксплуатируется ряд гидротехнических сооружений, основным назначением которых является предотвращение повреждения объектов транспортной и инженерной инфраструктуры в прибрежных частях населенных пунктов.
3. *Системы жизнеобеспечения.* Суровые климатические условия предъявляют особые требования к системам электро-, тепло- и водоснабжения, аварии на которых могут привести к тяжелым последствиям вплоть до принятия решения об эвакуации населения.

4. *Жилые объекты и объекты с массовым пребыванием людей.* На них могут происходить такие опасные события, как бытовые пожары, взрывы, обрушение зданий, конструкций.

Арктическая зона края подвергается широкому спектру природных опасных явлений и процессов:

- геологических (сейсмические воздействия, обвалы и оползни);
- гидрологических (наводнения, половодья, паводки, заторы, затопления, подтопления, лавинные явления и сели);
- метеорологических (сильный ветер (более 14 м/с), ураган (более 32 м/с), шторм, шквал (кратковременное усиление ветра до 20–30 м/с), гроза, ливень, град, снег, гололед, сильные снегопад и метель, туман, увеличение глубины оттаивания мерзлотного слоя);
- природные пожары;
- деградация экосистем вследствие антропогенной нагрузки (наблюдаются высокие риски деградации отдельных нефтедобывающих территорий: Собинский, Ванкорский, Кординский, Юрубченский участки) [6].

Большая часть арктических территорий только подлежит освоению, основная хозяйственная деятельность сконцентрирована в населенных пунктах и вдоль линейных объектов транспортной инфраструктуры. Таким образом, климатические особенности и техногенная нагрузка приводят к дестабилизации природной системы, возникновению экологических проблем и снижению качества жизни человека в экстремальных условиях проживания. В данной ситуации обеспечение природно-техногенной устойчивости, повышение защищенности населения и территорий возможно только при комплексном подходе к планированию и управлению рисками развития [7].

## 2. Метод определения устойчивости территорий к опасным событиям

Для установления влияния факторов опасности на устойчивость территорий целесообразно использовать байесовские сети доверия, которые представляют собой графические модели событий и процессов на основе объединения математического аппарата теории вероятностей и теории графов [8–12]. Байесовские сети — удобный инструмент для описания достаточно сложных процессов и событий с неопределенностями. Основная идея построения графической модели связана с понятием модульности, т. е. разложением сложной системы на простые элементы. Такой графотеоретический подход к построению модели обеспечивает возможность учитывать процессы с множеством взаимодействующих переменных, а также создавать структуры данных для последующей разработки эффективных алгоритмов их оценки и принятия решений.

Байесовская сеть доверия представляет собой направленный ациклический граф. Граф записывается как набор условий независимости: каждая переменная независима от ее основного события, при таком условии вероятность события вершины будет рассчитываться с помощью формулы полной вероятности. Если событие  $A$  может произойти только при выполнении одного из событий  $B_1, B_2, \dots, B_n$ , которые образуют полную группу несовместных событий, то вероятность события  $A$  вычисляется по формуле

$$P(A) = P(B_1)P(A|B_1) + P(B_2)P(A|B_2) + \dots + P(B_n)P(A|B_n).$$

Для расчета условных вероятностей определенного события вводится формула Байеса

$$P(A|B_i) = \frac{P(B_i)P(A|B_i)}{P(B_1)P(A|B_1) + P(B_2)P(A|B_2) + \dots + P(B_n)P(A|B_n)}.$$

В качестве примера вероятность возникновения группы событий “авария на транспорте” можно представить как

$$P = (P(A_{ж/д}) + P(A_в) + P(A_{вод}) + P(ДТП)) / (P(A_{ж/д}) + P(A_в) + P(A_{ПВОО}) + P(A_{вод}) + P(A_{РОО}) + P(A_{ХОО}) + P(B_6) + P(ДТП) + P(H_в) + P(H_г) + P(H_т) + P(H_э) + P(O_6) + P(\Pi_ж)), \quad (1)$$

где  $P(A_{ж/д})$ ,  $P(A_в)$  и  $P(A_{вод})$  — вероятность возникновения аварии на железнодорожном, воздушном и водном транспорте соответственно;  $P(A_{ПВОО})$ ,  $P(A_{РОО})$  и  $P(A_{ХОО})$  — на пожаро- и взрывоопасных, радиационно- и химически опасных объектах соответственно;  $P(H_в)$  и  $P(H_г)$  — на системах водо- и газоснабжения;  $P(H_т)$  и  $P(H_э)$  — на тепло- и электросетях;  $P(O_6)$ ,  $P(\Pi_ж)$  и  $P(B_6)$  — вероятность возникновения обрушения конструкций, пожара и взрыва в жилых объектах и с массовым пребыванием людей соответственно;  $P(ДТП)$  — вероятность возникновения дорожно-транспортных происшествий.

### 3. Вероятностно-графическая модель С-П-Т системы арктической территории Красноярского края

Анализ опасности территории с использованием байесовских сетей начинается с построения графа. На рис. 1 приведены факторы опасности, влияющие на устойчивость региональной С-П-Т системы. Основная вершина характеризует состояние устойчивости, на которое влияют факторы опасности, образующиеся в социо-, техно- и экосфере. Дочерними вершинами В1–В3 представлены элементы, в которых формируются опасности. Каждая группа, в свою очередь, содержит конкретные варианты развития события (рис. 2).

Расчеты, представленные в табл. 1, выполнены на основе официальной базы данных и Государственных докладов МЧС России с использованием формулы (1). Видно, что наибольший вклад в возникновение техногенного опасного события вносят аварии на транспортных путях, жилых объектах и с массовым пребыванием людей. В табл. 2 представлены вероятности возникновения техногенных опасных событий по отдельным муниципальным образованиям.

На основании полученных результатов оценки вероятностей возникновения опасных техногенных событий на арктической территории проведем расчет комплексного техногенного риска:

$$R_t^c = \sum_{i=1}^n P_i U_i. \quad (2)$$

Здесь  $P_i$  — вероятность наступления определенного фактора риска;  $U_i$  — ущерб от определенного фактора риска, млн руб (данные получены из официальной базы данных МЧС России). Комплексный риск территорий рассчитан по формуле (2) и определен по каждому техногенному фактору (табл. 3). Основной риск связан с бытовыми пожарами и авариями на воздушном и водном транспорте.

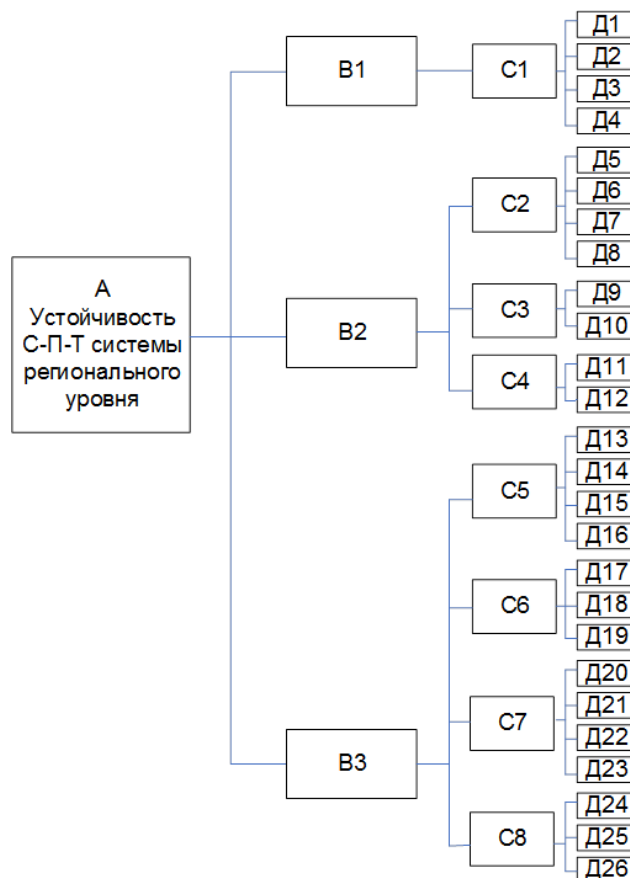


Рис. 1. Факторы опасности, влияющие на устойчивость функционирования С-П-Т системы  
 Fig. 1. Hazard factors affecting the sustainability of functioning of the socio-natural-technogenic system

Т а б л и ц а 1. Результаты расчета вероятности реализации опасных техногенных событий для арктических территорий Красноярского края  
 Table 1. Results of calculation of probability of realization of dangerous technogenic events for the Arctic territories of the Krasnoyarsk Territory

Основной фактор	Дочерний фактор (см. рис. 2)	Вероятность реализации	
		опасного события	группы событий
С5. Системы транспорта	Д13. ДТП	0.04347826	0.23913
	Д14. Авария на воздушном транспорте	0.136646	
	Д15. « на водном транспорте	0.052795	
	Д16. « на ж/д транспорте	0.0062112	
С6. Промышленные объекты	Д17. Авария на ХОО	0.0031	0.12111
	Д18. « на РОО	0.0217391	
	Д19. « на ПВОО	0.09627329	
С7. Системы жизнеобеспечения	Д20. Авария на теплосетях	0.0031	0.07452295
	Д21. « на системах газоснабжения	0.0031	
	Д22. « на электросетях	0.04658385	
	Д23. « на системах водоснабжения	0.0217391	
С8. Жилые объекты и объекты с массовым пребыванием людей	Д24. Пожары	0.522608696	0.5288808696
	Д25. Обрушения конструкций	0.0031	
	Д26. Взрывы	0.0031	

Уровень А	Уровень В	Уровень С	Уровень Д
			Д1 Опасные производственные факторы
		Риск	Д2 Антропогенные факторы
		заболеваемости	Д3 Социально-экономические факторы
		и смертности	Д4 Природно-климатические факторы
	В1 Социосфера	С1 человека	Д5 Пожары
			Д6 Насекомые вредители
		Нарушение лесной	Д7 Антропогенные факторы
		экосистемы	Д8 Природно-климатические факторы
		Нарушения водной	Д9 Антропогенные факторы
		экосистемы	Д10 Природно-климатические факторы
		Нарушения почвенной	Д11 Антропогенные факторы
		экосистемы	Д12 Природно-климатические факторы
Устойчивость С-П-Т системы регионального уровня	В2 Экосфера	С4	Д13 ДТП
			Д14 Аварии на воздушном транспорте
		С5 Системы транспорта	Д15 Аварии на водном транспорте
			Д16 Аварии на ж/д транспорте
			Д17 Аварии на ХОО
		С6 Промышленные объекты	Д18 Аварии на РОО
			Д19 Аварии на ПВОО
			Д20 Аварии на теплосетях
			Д21 Аварии на системах газоснабжения
			Д22 Аварии на электросетях
		С7 Системы жизнеобеспечения	Д23 Аварии на системах водоснабжения
		Жилые объекты и объекты с массовым пребыванием людей	Д24 Пожары
			Д25 Обрушение конструкций
	В3 Техносфера	С8	Д26 Взрывы

Рис. 2. Описание факторов опасности  
Fig. 2. Description of hazards

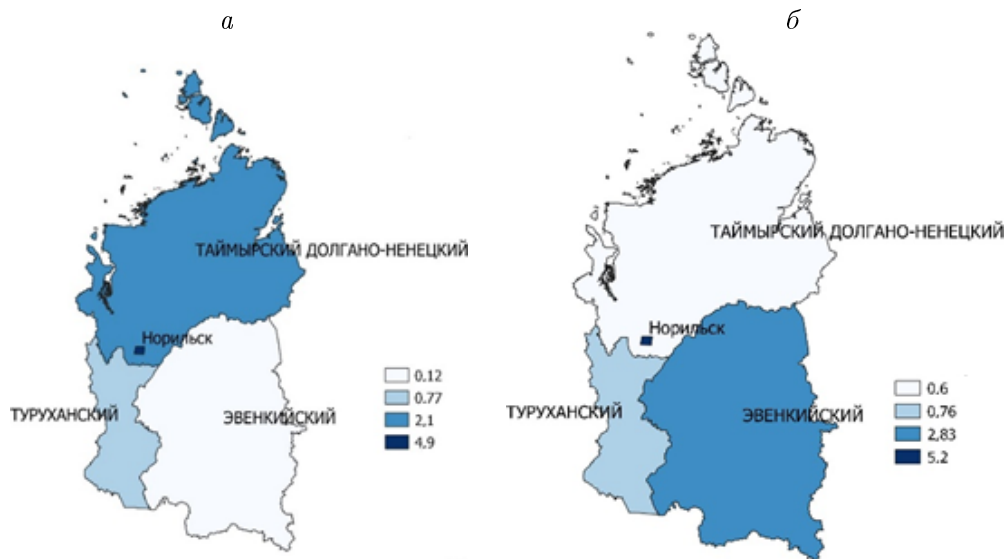


Рис. 3. Пространственное распределение комплексного риска аварий на воздушном транспорте (а) и бытовых пожаров (б)

Fig. 3. Spatial distribution of complex risk of air transport accidents (a) and domestic fires (b)

Т а б л и ц а 2. Результаты расчета вероятности реализации опасных техногенных событий для территориальных образований Арктической зоны Красноярского края

Table 2. Results of calculation of probability of realization of dangerous technogenic events for territorial formations of the Arctic zone of the Krasnoyarsk Territory

Основной фактор	Дочерний фактор (см. рис. 2)	Таймырский Долгано-Ненецкий район	Эвенкийский район	Туруханский район	Норильск
С5. Транспортные пути	Д13. ДТП	0.015337	0.006135	—	0.0214724
	Д14. Авария на воздушном транспорте	0.015337	0.015337	0.030675	0.0552147
	Д15. « на водном транспорте	0.018405	0.027907	0.006135	0.00307
	Д16. « на ж/д транспорте	—	0.00307	—	0.00307
С6. Промышленные объекты	Д17. Авария на ХОО	—	0.0092	0.00307	0.0092
	Д18. « на РОО	—	—	—	0.00307
	Д19. « на ПВОО	0.00614	0.02761	0.0092	0.0521424
С7. Системы жизнеобеспечения	Д20. Авария на теплосетях	—	0.00307	—	—
	Д21. « на системах газоснабжения	—	—	—	0.00307
	Д22. « на электросетях	0.0122699	0.0122699	—	0.0214724
	Д23. « на системах водоснабжения	—	—	—	0.0214724
С8. Жилые объекты и объекты с массовым пребыванием людей	Д24. Пожары	0.0398769	0.144172	0.064717	0.300613
	Д25. Обрушения конструкций	—	—	—	0.00307
	Д26. Взрывы	—	—	—	0.00307

Т а б л и ц а 3. Результаты расчета техногенного риска Арктической зоны Красноярского края

Table 3. The results of the calculation of technogenic risk of the Arctic zone of the Krasnoyarsk Territory

Фактор риска	Риск
Д13. ДТП	0.4
Д14. Авария на воздушном транспорте	7.99
Д15. « на водном транспорте	1.9
Д16. « на ж/д транспорте	0.00025
Д17. « на ХОО	0.144
Д18. « на РОО	0
Д19. « на ПВОО	0.76
Д20. « на теплосетях	0.000003
Д21. « на системах газоснабжения	0.00005
Д22. « на электросетях	0.1
Д23. « на системах водоснабжения	0.2
Д24. Пожары	12.64
Д25. Обрушения конструкций	0.0001
Д26. Взрывы	0.0017



На рис. 3 приведено пространственное распределение комплексного риска аварий на воздушном транспорте и бытовых пожаров на арктической территории Красноярского края, полученное средствами ГИС. Для Таймырского Долгано-Ненецкого и Туруханского районов наибольший риск связан с авариями на воздушном транспорте, ущербы от реализации которых варьируются от 20 до 140 млн руб. В Эвенкийском муниципальном районе наибольший ущерб вызван авариями на водном транспорте, а наибольшая вероятность реализации опасного события связана с бытовыми пожарами. В Норильске высокий риск связан с авариями на воздушном транспорте и пожаро-взрывоопасными ситуациями на промышленных предприятиях, на объектах с массовым пребыванием людей и в жилой зоне, что объясняется большей плотностью населения (в сравнении с муниципальными районами) и значительным трафиком Норильского аэропорта, который занимает четвертое место в стране по объему грузоперевозок.

#### 4. Обсуждение результатов

Перспектива применения байесовского подхода предопределена интересом ученых и исследователей в области искусственного интеллекта, теории принятия решений, статистики, логики, философии, когнитивной психологии и наук об управлении. Методология построения вероятностно-графических моделей основана на обобщении неструктурированного массива данных в процессе создания модели с помощью байесовских статистических методов.

Сегодня байесовский подход широко применяется в медицинской диагностике, при оценке экономических моделей, в программах машинного обучения [13]. В последние годы аппарат нечетких байесовских сетей используется и при оценке экологических рисков [14]. Отметим, что исследуемые области знаний не затрагивают оценку устойчивого развития территорий на основе анализа факторов опасностей, возникающих в техносфере. Предложенная методика оценки вероятности возникновения опасных техногенных событий с помощью метода байесовских сетей позволяет получить количественные оценки рисков. Представленный метод оценки рисков может быть как самостоятельным, так и дополнять другие методы.

#### Заключение

Результаты работы позволяют сделать вывод о возможности применения байесовского подхода в методике оценки техногенного территориального риска. Идентификация источников опасности показала наличие высокого риска из-за различных пожаро- и взрывоопасных ситуаций и аварий на воздушном транспорте. Предложенная модель имеет возможность широкого применения и позволяет всесторонне оценить влияние опасных факторов на устойчивое развитие территорий. Дальнейшее развитие работы связано с увеличением массива данных путем включения в байесовскую сеть дополнительных факторов, формирующих угрозы в С-П-Т системе, и предполагает переход к методам управления, направленным на минимизацию риска за счет воздействия на преобладающие факторы.

Устойчивость территории определяется уровнем защищенности от различных видов угроз. Переход к устойчивому развитию направлен на обеспечение решения проблем социально-экономического развития и сохранение благоприятной окружающей среды и природно-ресурсного потенциала.

Увеличение рисков как для жизни и здоровья населения, так и для состояния окружающей среды связано с возрастанием антропогенного воздействия на территорию. В обоих случаях получение качественных и количественных оценок риска неблагоприятных ситуаций и воздействий становится ключевой задачей, решение которой определяет эффективность разработки и реализации управленческих решений по защите населения и состояния окружающей среды. Управление территориальным образованием должно основываться на оценке комплексного техногенного риска и выявлении наиболее опасных факторов, которые требуют особого внимания и контроля.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке “Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности” в рамках реализации научного проекта № 2022102508960 “Анализ устойчивости Арктических территорий Красноярского края на основе оценки климатических рисков”.

## Список литературы

- [1] Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года (Указ Президента Российской Федерации № 645 от 26 октября 2020 года). М.; 2020. Адрес доступа: <https://docs.cntd.ru/document/566091182>.
- [2] Стратегия социально-экономического развития Сибирского федерального округа до 2035 года (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 26.01.2023 г. № 129-р). М.; 2023. Адрес доступа: <http://government.ru/docs/all/145780>.
- [3] Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2021 году. М.: МЧС России. ФГБВОУ ВО “Академия гражданской защиты МЧС России”; 2022: 250.
- [4] Ответственное управление для устойчивой Арктики. Арктический совет. Председательство России. Адрес доступа: <https://arctic-council-russia.ru/useful/regions/krasnoyarskiy-kray/?ysclid=1f9hccbae5689047975>.
- [5] **Шишацкий Н.Г.** Перспективы развития северных и арктических районов в рамках мегапроекта “Енисейская Сибирь”. Арктика и Север. 2018; (33):66–90. DOI:10.17238/issn2221-2698.2018.33.66. Адрес доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_36767913\\_26068551.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_36767913_26068551.pdf).
- [6] **Левкевич В.Е., Лепихин А.М., Москвичев В.В., Никитенко П.Г., Ничепорчук В.В., Шапарев Н.Я., Шокин Ю.И.** Безопасность и риски устойчивого развития территорий. Красноярск: Сибирский федеральный университет; 2014: 224.
- [7] **Москвичев В.В., Бычков И.В., Потапов В.П., Тасейко О.В., Шокин Ю.И.** Информационная система территориального управления рисками развития и безопасностью. Вестник Российской академии наук. 2017; (8):696–705. DOI:10.7868/S0869587317080035. Адрес доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_29751104\\_58732278.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_29751104_58732278.pdf).
- [8] **Фортон В.Е., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Фомин В.М.** Машиностроение России: техника Сибири, Севера и Арктики. Красноярск: Сибирский федеральный университет; 2018: 178.
- [9] **Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В.** Циклы в байесовских сетях, вероятностная семантика и отношения с соседними узлами. Труды СПИИРАН. 2006; (3):240–263. Адрес доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15555316>.
- [10] **Heckerman D., Chickering D.M., Meek C., Rounthwaite R., Kadie C.** Dependency networks for inference collaborative filtering and data visualization. Journal of Machine

- Learning Research. 2000; (1):49–75. Available at: <https://www.jmlr.org/papers/volume1/heckerman00a/heckerman00a.pdf>.
- [11] **Cowell R.G., Dawid A.P., Lauritzen S.L., Spiegelhalter D.J.** Probabilistic networks and expert systems: tutorial. N.Y.: Springer-Verlag; 1999: 205. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/221995760\\_Probabilistic\\_Networks\\_and\\_Expert\\_Systems#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/221995760_Probabilistic_Networks_and_Expert_Systems#fullTextFileContent).
- [12] **Pan L., Zheng Y., Zheng J., Xu B., Liu G., Wang M., Yang D.** Characteristics of chemical accidents and risk assessment method for petrochemical enterprises based on improved FBN. Sustainability. 2022; 14(19):12072. DOI:10.3390/su141912072.
- [13] **Димитрова Л.К., Голубева О.А.** Применение байесовской сети в дифференциальной диагностике артериальной гипертензии. Технические науки в России и зарубежом: материалы III Международной научной конференции. М.: Буки-Веди; 2014: 4–14.
- [14] **Aguilera P.A., Fernández A., Fernández R., Rumí R., Salmerón A.** Bayesian networks in environmental modelling. Environ Model Software. 2011; 26(12):1376–1388. (In Eng.)

---

Вычислительные технологии, 2023, том 28, № 4, с. 45–56. © ФИЦ ИВТ, 2023  
Computational Technologies, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 45–56. © FRC ICT, 2023

ISSN 1560-7534  
eISSN 2313-691X

---

MATHEMATICAL MODELLING

---

DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.005

**Analysis of the stability of the technosphere of the Arctic territories of the Krasnoyarsk Territory using probabilistic and graphical models**

V. V. MOSKVICHEV<sup>1,2</sup>, U. S. POSTNIKOVA<sup>1,3,\*</sup>, O. V. TASEIKO<sup>1,3</sup>, I. S. EFREMOVA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 660049, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 660049, Krasnoyarsk, Russia

\*Corresponding author: Ulyana S. Postnikova, e-mail: [ulyana-ivanova@inbox.ru](mailto:ulyana-ivanova@inbox.ru)

Received March 30, 2023, revised May 04, 2023, accepted May 11, 2023.

**Abstract**

The main factors influencing the sustainable development of the territories of the Far North and the Arctic zone of the Krasnoyarsk Territory, taking into account natural and climatic features, are considered. The general characteristics and assessment of the state of industrial infrastructure are provided, data on the accident rate of technosphere objects are given. On the basis of bayesian networks, a methodology for assessing the probability of occurrence of dangerous technogenic events is proposed and estimates of the technogenic risk of the Arctic zone of the Krasnoyarsk Territory are made.

*Keywords:* socio-natural-technogenic system, sustainable development, Arctic zone, bayesian networks.

*Citation:* Moskvichev V.V., Postnikova U.S., Taseiko O.V., Efremova I.S. Analysis of the stability of the technosphere of the Arctic territories of the Krasnoyarsk Territory using probabilistic and graphical models. Computational Technologies. 2023; 28(4):45–56. DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.005. (In Russ.)

**Acknowledgements.** The study was carried out with the financial support of the Krasnoyarsk Regional Fund for the Support of Scientific and Scientific-Technical Activities within the framework of the scientific project № 2022102508960 “Analysis of the stability of the Arctic territories of the Krasnoyarsk Territory based on climate risk assessment”.

## References

1. Strategiya razvitiya Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii i obespecheniya natsional'noy bezopasnosti na period do 2035 goda (Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii No. 645 ot 26 oktyabrya 2020 goda) [Strategy for the development of the Arctic Zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035 (Decree of the President of the Russian Federation No. 645 of October 26, 2020)]. Moscow; 2020. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/566091182>. (In Russ.)
2. Strategiya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Sibirskogo federal'nogo okruga do 2035 goda (Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 26.01.2023 g. No. 129-r) [Strategy of socio-economic development of the Siberian Federal District until 2035 (Decree of the Government of the Russian Federation No. 129-r of 26.01.2023)]. Moscow; 2023. Available at: <http://government.ru/docs/all/145780>. (In Russ.)
3. Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii zashchity naseleniya i territoriy Rossiyskoy Federatsii ot chrezvychnykh situatsiy prirodno i tekhnogennogo kharaktera v 2021 godu [State report on the status of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made hazards in 2021]. Moscow: MChS Rossii. FGBVOU VO "Akademiya grazhdanskoj zashchity MChS Rossii"; 2022: 250. (In Russ.)
4. Otvetstvennoe upravlenie dlya ustoychivoy Arktiki. Arkticheskiy sovet. Predsedatel'stvo Rossii [Responsible Governance for sustainable Arctic. Arctic council. Russia's Chairmanship]. Available at: <https://arctic-council-russia.ru/useful/regions/krasnoyarskiy-kray/?ysclid=1f9hccbae5689047975>. (In Russ.)
5. **Shishatsky N.G.** The prospects of the Northern and Arctic territories and their development within the Yenisei Siberia megaproject. Arctic and North. 2018; (33):66–90. DOI:10.17238/issn2221-2698.2018.33.66. Available at: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_36767913\\_26068551.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_36767913_26068551.pdf). (In Russ.)
6. **Levkevich V.E., Lepikhin A.M., Moskvichev V.V., Nikitenko P.G., Nicheporchuk V.V., Shaparev N.Ya., Shokin Yu.I.** Bezopasnost' i riski ustoychivogo razvitiya territoriy [Security and risks for sustainable development of territories]. Krasnoyarsk: Sibirskiy Federal'nyy Universitet; 2014: 224. (In Russ.)
7. **Moskvichev V.V., Bychkov I.V., Potapov V. P., Taseiko O.V., Shokin Yu.I.** Information system for territorial risk management development and safety. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2017; (8):696–705. DOI:10.7868/S0869587317080035. Available at: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_29751104\\_58732278.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_29751104_58732278.pdf). (In Russ.)
8. **Fortov V.E., Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Fomin V.M.** Mashinostroenie Rossii: tekhnika Sibiri, Severa i Arktiki [Mechanical Engineering of Russia: technique of Siberia, the North and the Arctic]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2018: 178. (In Russ.)
9. **Tulupyev A.L., Nikolenko S.I., Sirotkin A.V.** Cycles in bayesian networks: probabilistic semantics and relations with neighboring nodes. SPIIRAS Proceedings. 2006; (3):240–263. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15555316>. (In Russ.)
10. **Heckerman D., Chickering D.M., Meek C., Rounthwaite R., Kadie C.** Dependency networks for inference collaborative filtering and data visualization. Journal of Machine Learning Research. 2000; (1):49–75. Available at: <https://www.jmlr.org/papers/volume1/heckerman00a/heckerman00a.pdf>.
11. **Cowell R.G., Dawid A.P., Lauritzen S.L., Spiegelhalter D.J.** Probabilistic networks and expert systems: tutorial. N.Y.: Springer-Verlag; 1999: 205. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/221995760\\_Probabilistic\\_Networks\\_and\\_Expert\\_Systems#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/221995760_Probabilistic_Networks_and_Expert_Systems#fullTextFileContent).
12. **Pan L., Zheng Y., Zheng J., Xu B., Liu G., Wang M., Yang D.** Characteristics of chemical accidents and risk assessment method for petrochemical enterprises based on improved FBN. Sustainability. 2022; 14(19):12072. DOI:10.3390/su141912072.
13. **Dimitrova L.K., Golubeva O.A.** Application of the Bayesian network in the differential diagnosis of arterial hypertension. Technical Sciences in Russia and Abroad: Materials of the III International Scientific Conference. Moscow: Buki-Vedi; 2014: 4–14. (In Russ.)
14. **Aguilera P.A., Fernández A., Fernández R., Rumí R., Salmerón A.** Bayesian networks in environmental modelling. Environ Model Software. 2011; 26(12):1376–1388. (In Eng.)