

УДК 551.4.012

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ РИСКОВ В ПРЕДЕЛАХ ЭРОЗИОННО-ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН ПОД ДЕЙСТВИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ

© 2023 г. А. С. Викторов^{1,*}, В. Н. Капралова¹, М. В. Архипова¹, Т. В. Орлов¹

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук
Уланский переулок, 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: vic_as@mail.ru

Поступила в редакцию 05.09.2022 г.

После доработки 04.11.2022 г.

Принята к публикации 21.11.2022 г.

Актуальность оценки риска для инженерных сооружений в условиях опасных геологических процессов определяется все более изменяющимися природными условиям в зонах многолетней мерзлоты. Статистический подход к исследованию сопровождается определенными трудностями, так как накопление статистики требует значительного времени, и это время зачастую сравнимо со временем функционирования сооружения. Главный и наиболее трудный этап оценки риска – оценка вероятности поражения инженерных сооружений опасным геологическим процессом. Целью исследования являлось обоснование способа решения данной задачи на территории эрозионно-термокарстовых равнин для линейных объектов с помощью методов математической морфологии ландшафта, который позволяет перейти к количественной оценке риска. При применении методов математической морфологии ландшафта любая неоднородная территория предварительно разбивается на участки, однородные по условиям протекания процессов. В основе методики лежит разработанная авторами модель развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовой равнины в условиях асинхронного старта, реализующаяся по данным эмпирической проверки в наибольшем числе случаев. Модель применялась на 4 ключевых участках, расположенных в разных физико-географических условиях, но имеющих морфологическую однородность. По материалам космической съемки разных сроков проводилось дешифрирование термокарстовых озер и хасыре-ев. Средняя плотность числа поражений на разных участках колеблется 0.00026 год^{-1} до 0.00104 год^{-1} , при этом четкой тенденции изменения во времени не наблюдается. По количественным экспериментальным данным наблюдается дифференцированное по участкам изменение риска поражений линейных сооружений в пределах эрозионно-термокарстовых равнин за последние несколько десятков лет (46–56 лет). Вероятность поражения линейных сооружений значительно изменилась (6–9 раз) на лишь одном участке (Яно-Индибирская низменность), что подтверждает критерий хи-квадрат. Такая ситуация наблюдается при длинах линейных сооружений 3–4 км. Однако на большей части ключевых участков отсутствует значимое изменение вероятности поражения, несмотря на идущие климатические изменения.

Ключевые слова: математическая модель, морфология ландшафта, криолитозона, опасные геологические процессы, оценка риска

DOI: 10.31857/S0869780923030128, **EDN:** WNOINK

ВВЕДЕНИЕ

Оценка риска в условиях развития опасных геологических процессов – одна из актуальных задач, особенно она важна в быстро изменяющихся природных условиях северных регионов. Наиболее часто мерой риска является один из следующих параметров [4]:

– вероятность той или иной степени поражения инженерного сооружения опасным геологическим процессом,

– средний риск – математическое ожидание величины поражения (например, площади или длины) инженерного сооружения опасным геологическим процессом,

– вероятностное распределение величины поражения инженерного сооружения опасным геологическим процессом (общей величины поражения инженерного сооружения, величины поражения единицы длины и др.).

– предельное значение величины поражения инженерного сооружения опасным геологическим процессом.

Оценке риска поражения инженерных сооружений посвящено много исследований [2, 4–7 и др.]. Как правило, оценка риска нужна в момент проектирования сооружений, расположенных на конкретной территории и в конкретных природных условиях. При статистическом подходе исследователь сталкивается с определенными проблемами, поскольку накопление статистики требует значительного времени, которое зачастую сравнимо со временем функционирования сооружения. Главным и наиболее трудным этапом оценки риска является оценка вероятности поражения инженерных сооружений опасным геологическим процессом.

Мы попытались развить и обосновать способ решения данной задачи на территории эрозионно-термокарстовых равнин для линейных объектов с помощью методов математической морфологии ландшафта, позволяющих перейти к количественной оценке риска.

При использовании предлагаемого подхода задача оценки риска решается для однородного участка, поэтому при применении методов математической морфологии ландшафта любую неоднородную территорию надо предварительно разбить на участки, однородные по условиям протекания процессов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу решения задачи положена разработанная авторами модель развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовой равнины в условиях асинхронного старта, реализующаяся по данным эмпирической проверки в наибольшем числе случаев [9]. Она основывается на следующих допущениях:

1. Возникновения первичных термокарстовых понижений (очагов) за непересекающиеся отрезки времени и на непересекающихся площадках являются независимыми случайными событиями; вероятность возникновения понижения зависит только от величины отрезка времени и размеров площадки.¹

2. Возникновение первичных термокарстовых понижений не происходит на площади существующих термокарстовых озер.

3. Изменение радиуса возникшего термокарстового понижения представляет собой случайный процесс; оно происходит независимо от других озер, и его скорость, находясь под воздей-

ствием случайных факторов, при этом пропорциональна плотности тепловых потерь через боковую поверхность озерной котловины.

4. В процессе роста озеро может перейти в хасырей при его спуске эрозионной сетью, вероятность этого не зависит от других озер; при этом рост озера прекращается.

5. Возникновения истоков эрозионных форм на непересекающихся площадках являются независимыми случайными событиями, и вероятность их определяется только величиной площадки².

Анализ вероятности поражения линейного сооружения в условиях эрозионно-термокарстовых равнин учитывал следующие факторы:

– возможность поражения растущими очагами термокарстового процесса:

○ существовавшими к началу периода функционирования сооружения,

○ возникшими уже в период функционирования сооружения;

– возможность остановки роста термокарстового очага эрозионными процессами и ликвидации риска для линейного сооружения,

– возможность поражения растущими очагами термокарстового процесса с их последующей (после поражения сооружения) трансформацией в хасырей.

Согласно полученным результатам [1], по прошествии значительного времени, когда возникает состояние динамического равновесия морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин, распределение размера (площади) озера становится интегрально-экспоненциальным распределением.

В итоге математического анализа модели были получены выражения, характеризующие вероятность поражения линейного сооружения очагами термокарстового процесса за заданное время функционирования. Распределение числа поражений линейного сооружения за заданный интервал времени как существующими, так и выродившимися (в настоящее время трансформировавшимися в хасырей) очагами должно отвечать распределению Пуассона [8]. При использовании линейных приближений число поражений можно рассматривать как пуассоновский процесс.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭРОЗИОННО-ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН

Апробация модели проводилась на 4 тестовых участках общей площадью 6442 км², расположенных в разных физико-географических условиях

¹ При этом для малых площадок и временных отрезков вероятность возникновения нескольких понижений много меньше, чем вероятность возникновения одного понижения.

² При этом для малых площадок вероятность наличия более чем одного истока много меньше, чем вероятность наличия одного истока.



Рис. 1. Схема расположения ключевых участков.

(рис. 1). При выборе участков руководствовались морфологической однородностью участка и наличием данных дистанционного зондирования на данную область.

Все участки представляют собой тундровые равнины, сложенные среднечетвертичными аллювиальными отложениями разной льдистости и расположены на террасах речных долин и морских террасах.

Материалы аэро- или космической съемки выбраны с учетом возможной максимизации пространственного разрешения и получения существенных временных интервалов между сроками съемок.

Дешифрирование активных и вырожденных (хасыреи) термокарстовых очагов выполнялось в интерактивном режиме с повторной проверкой и сравнением дешифрирования разных сроков. Последнее осуществлялось для исключения кажущихся изменений.

Формирование массива модельных линейных инженерных сооружений в пределах каждого участка выполнялось в среде ARCGIS с использованием датчика случайных чисел. Для каждой пары сроков съемки моделировалась ситуация создания линейного сооружения в первый срок и подсчета частоты поражения по второму сроку. Для этого случайным образом (с использованием датчика случайных чисел) набрасывался массив фрагментов линейных сооружений фиксированной длины и параллельного направления на изображение срока 1. Из них отбраковывались сооружения, пересекавшие активные очаги (таким образом моделировалось создание линейных сооружений, обходящих существующие термокарстовые очаги). Получившийся откорректированный массив сравнивался с изображением срока 2, и подсчитывалась частота поражения. Процедура повторялась для разных длин модельных сооруже-

ний (1.0, 2.0 и 3.0 км). Объем выборок (после отбраковки) составлял 104–392 элемента.

На последнем этапе для каждого участка сравнивались частоты поражения линейных инженерных сооружений для разных временных интервалов. Изображения участков на космических снимках разных сроков приведены на рис. 2 а–г.

На каждой паре изображений, отвечающих разным срокам съемки, согласно методике, производилось расположение случайным образом (рис. 3) линейных инженерных сооружений с последующей отбраковкой; для этого использовались датчики случайных чисел. Данные по конкретным объемам полученных в итоге выборок приведены в табл. 1.

В процессе сравнения проверялась гипотеза о неизменности параметров случайного процесса, а именно параметра средней плотности числа поражений линейных сооружений (среднее число поражений отрезка сооружения рассматриваемой длины в единицу времени) за первый и второй временной интервалы. Проверка базировалась на ранее полученном результате, что при отсутствии климатического тренда на однородном участке эрозионно-термокарстовой равнины распределение числа поражений описывается пуассоновским распределением. При этом, если использовать для среднего числа поражений линейное приближение по времени, то средняя плотность поражений должна оставаться постоянной.

В связи с этим проверка производилась согласно следующей процедуре:

1) определение среднего значения *числа поражений* θ_1 отрезка сооружения рассматриваемой длины L за первый временной интервал:

$$\theta_1 = \frac{k}{n_1} \quad (1)$$

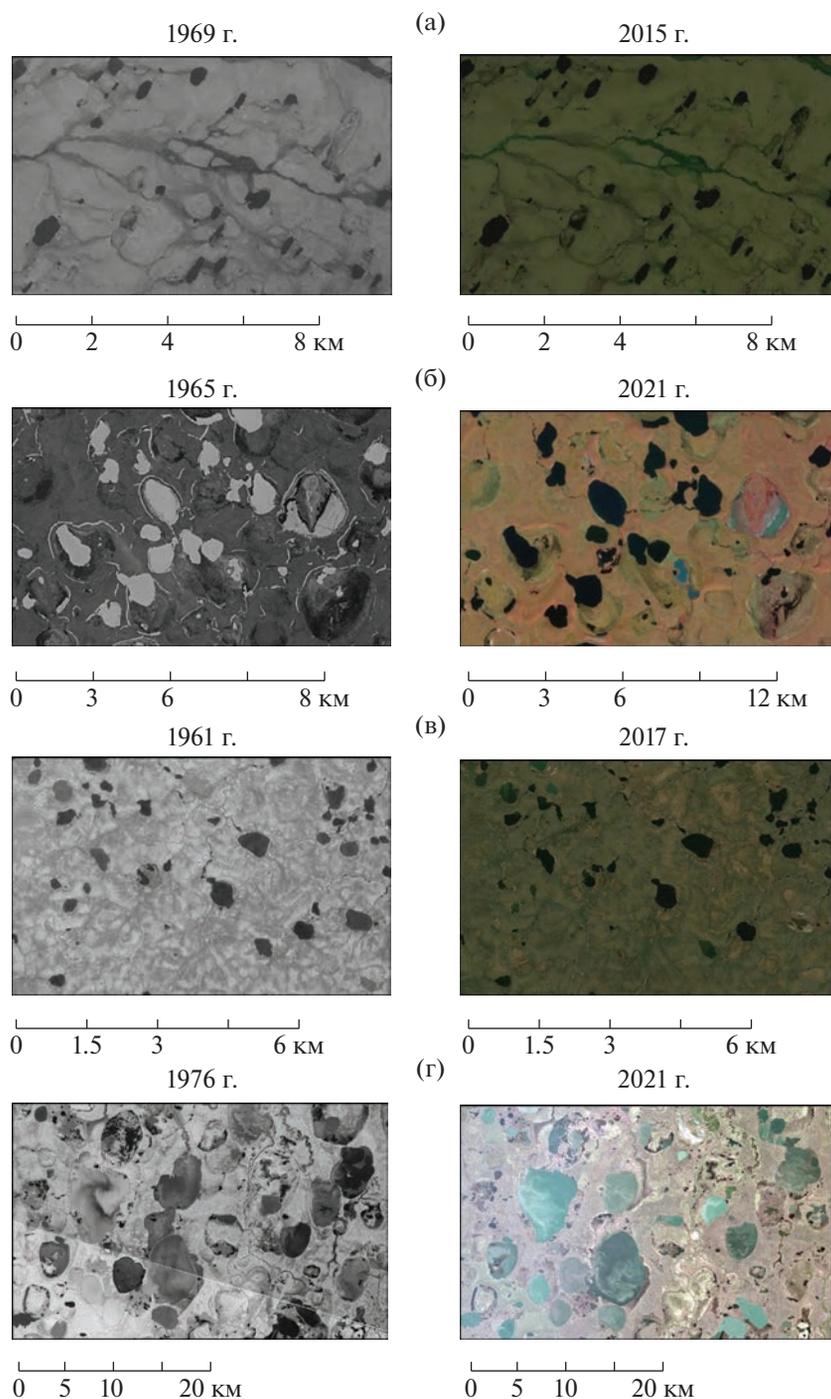


Рис. 2. Примеры изображения ключевых участков на материалах космической съемки: а – участок 40, б – участок 28, в – участок 30, г – участок 35.

2) определение среднего значения плотности поражений λ_1 отрезка сооружения рассматриваемой длины L за первый временной интервал:

$$\lambda_1 = \frac{k_1}{t_1 n_1}. \quad (2)$$

3) определение теоретического значения *среднего числа поражений* отрезка сооружения той же длины L за 2-й интервал по данным 1-го интервала, которое при истинности проверяемой гипотезы равно

$$\theta_2 = \lambda_1 t_2, \quad (3)$$

Таблица 1. Среднее число поражения модельных линейных сооружений для разных временных интервалов

Индекс участка, регион	Длина модельного сооружения, км	Временной интервал, длительность					
		Число модельных сооружений	Средняя плотность поражений λ_1 , год ⁻¹	Число модельных сооружений	Средняя плотность поражений λ_1 , год ⁻¹	Число модельных сооружений	Средняя плотность поражений λ_1 , год ⁻¹
28 Кольская низменность		1965–2013 48 лет		2013–2021 8 лет		1965–2021 56 лет	
	1	332	0.00044	326	0.00038	332	0.00043
	2	163	0.00077	157	0.00075	163	0.00077
3	185	0.00090	180	0.00075	185	0.00088	
30 Ямал		1961–1979 28 лет		1979–2017 38 лет		1961–2017 66 лет	
	1	104	0.00104	101	0.00026	104	0.00058
	2	283	0.00014	282	0.00011	283	0.00006
3	176	0.00039	174	0.00045	176	0.00042	
40 Чукотка		1969–1980 11 лет		1980–2015 35 лет		1969–2015 46 лет	
	1	392	0.00073	389	0.00037	392	0.00043
	2	321	0.00027	320	0.00026	321	0.00026
3	176	0.00100	174	0.00049	176	0.00061	
35 Яно-Индигир- ская низмен- ность		1976–1999 23 года		1999–2021 22 года		1976–2021 45 лет	
	2	210	0.00083	206	0.00045	210	0.00064
	3	171	0.00026	170	0.00159	171	0.00091
	4	133	0.00035	132	0.00277	133	0.00151

Таблица 2. Сравнение расчетной вероятности поражения модельных линейных сооружений на втором временном интервале с фактической частотой поражения

Индекс участка, регион	Длина отрезка, км	Временной интервал, длительность					Фактическая частота поражения
		Среднее число поражений θ_1	Частота поражений k_2	Расчетное среднее число поражений (интервал 1), θ_2	Расчетная вероятность поражения (по данным интервала 1), $P(k_2)$	Значение критерия хи-квадрат	
28 Колымская низменность		Интервал 1 1965–2013 48 лет		Интервал 2013–2021 8 лет			
	1	0.018	1	0.003	0.003	0.017	0.003
	2	0.037	1	0.006	0.006	0.002	0.006
	3	0.043	1	0.006	0.005	0.058	0.006
30 Ямал		Интервал 1 1961–1979 28 лет		Интервал 2 1979–2017 38 лет			
	1	0.029	1	0.039	0.038	2.221	0.010
	2	0.004	1	0.005	0.005	0.091	0.004
	3	0.011	3	0.015	0.015	0.043	0.017
40 Чукотка		Интервал 1 1969–1980 11 лет		Интервал 2 1980–2015 35 лет			
	1	0.008	5	0.024	0.024	2.080	0.013
	2	0.003	3	0.010	0.010	0.008	0.009
	3	0.011	4	0.025	0.025	0.822	0.016
35 Яно-Индигир- ская низменность		Интервал 1 1976–1999 23 года		Интервал 2 1999–2021 22 года			
	2	0.019	2	0.018	0.018	0.809	0.010
	3	0.006	6	0.006	0.006	27.063	0.035
	4	0.008	8	0.007	0.007	52.984	0.061

где t_1, t_2 – длительности соответственно 1-го и 2-го временных интервалов, k_1, k_2 – общее число поражений модельных сооружений хотя бы одним очагом в выборках для соответствующего временного интервала (частота поражений), n_1 – объем выборки для первого временного интервала;

4) вычисление расчетной вероятности наблюдаемого числа поражений хотя бы одним очагом k_2 на 2-м временном интервале по данным 1-го интервала на основе использования распределения Пуассона:

$$P(k_2) = 1 - e^{-\theta_2}. \quad (4)$$

5) сопоставление расчетной вероятности поражения линейного сооружения на втором временном интервале с частотой поражения k_2 по критерию хи-квадрат [3]. Согласно использованной схеме, фактическое значение критерия сравнивалось с критическим хи-квадрат при одной степени свободы (3.841).

Также было выполнено сравнение расчетной вероятности поражения линейного сооружения на втором временном интервале с фактической частотой (эмпирической вероятностью) поражения; последняя, в нашем случае, поскольку не наблюдалось случаев нескольких поражений одного сооружения, равна среднему числу поражений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования, выполненные по изложенной методике, позволили получить следующие результаты. Средняя плотность числа поражений на разных участках колеблется 0.00026 год^{-1} до 0.00104 год^{-1} , при этом четкой тенденции изменения во времени не наблюдается. Только на Яно-Индибирской низменности наблюдается резкое превышение за последние 22 года средней плотности поражения над типичными значениями до величин 0.00159 и 0.00277 год^{-1} .

Как показывает анализ, вероятность поражения линейных сооружений значимо (на уровне 0.95) изменилось на участке 35 (Яно-Индибирская низменность); это подтверждает значение критерия хи-квадрат (табл. 2). Вероятность поражения на временном интервале 2013–2021, рассчитанная как продолжение хода процесса на предыдущем временном интервале 1, много меньше фактической частоты поражения. Иначе говоря, вероятность поражения увеличилась по полученным оценкам в 6–9 раз. Такая ситуация наблюдается при длинах линейных сооружений 3–4 км.

В то же время на большей части ключевых участков отсутствует значимое (на уровне 0.95) изменение вероятности поражения. Это показы-

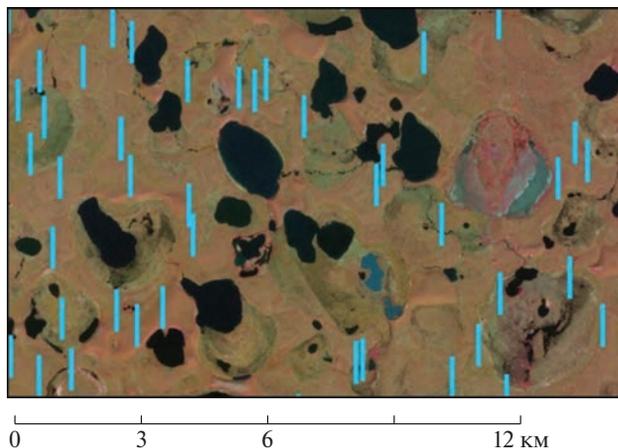


Рис. 3. Пример расположения модельных линейных сооружений на ключевом участке.

вают значения критерия хи-квадрат и прямое сравнение значений фактических частот и расчетных вероятностей (см. табл. 2). Кроме того, отличия расчетной вероятности на втором интервале и фактической частоты могут иметь как положительные, так и отрицательные значения.

ВЫВОДЫ

1. По количественным экспериментальным данным, на базе модельных линейных сооружений, наблюдается дифференцированное по участкам изменение риска поражений линейных сооружений в пределах эрозионно-термокарстовых равнин за последние несколько десятков лет (46–56 лет).

2. На значительной части участков развития эрозионно-термокарстовых равнин риски изменились незначительно, несмотря на идущие климатические изменения.

3. В то же время на отдельных участках эрозионно-термокарстовых равнин вероятность поражения линейных сооружений демонстрирует многократное увеличение (в 6–9 раз для модельных сооружений рассмотренных длин), выходя за пределы случайных изменений.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 18-17-00226П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторов А.С., Трапезникова О.Н., Орлов Т.В., Садков С.А. Использование подходов математической морфологии ландшафта при дистанционной оценке природных опасностей // Геоэкология. 2019. № 5. С. 61–73.
2. Елкин В.А. Региональная оценка карстовой опасности и риска (на примере Республики Татарстан):

- автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. 2004. М.: ИГЭ РАН. 24 с.
3. Крамер. Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1970. 648 с.
 4. Осипов В.И. Природные опасности и стратегические риски в мире и в России // Экология и жизнь. 2009. Вып. 11–12 (96–97). С. 5–15.
 5. Оценка и управление природными рисками: Матер. Всерос. конф. “РИСК-2003”, Т. 1. М.: РУДН, 2003. 412 с.
 6. Оценка и управление природными рисками. Тематический том 6 / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Изд. фирма “КРУК”, 2003. 320 с.
 7. Рагозин А.Л. Основные положения теории опасных геологических процессов и рисков // Новые идеи в науках о земле: тез. докл. III междунар. конф. М., 1997. Т. 4. 115 с.
 8. Victorov A., Orlov T., Trapeznikova O. The morphological pattern development of thermokarst plains with fluvial erosion: stochastic modeling for risk assessment // Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2019. 2019. V. 19. Is. 1.2. P. 531–541.
 9. Victorov A.S., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Kapralova V.N., Arkhipova M.V. Regularities of the distribution of lake areas on thermokarst plains with fluvial erosion // Doklady Earth Sciences. 2020. T. 491. № 2. С. 282–284.

EVALUATION OF NATURAL RISK CHANGES WITHIN EROSIONAL THERMOKARST PLAINS UNDER THE IMPACT OF CLIMATIC TRENDS

A. S. Viktorov^{a,#}, V. N. Kapralova^a, M. V. Arkhipova^a, and T. V. Orlov^a

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulansky per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

[#]*E-mail: vic_as@mail.ru*

The relevance of assessing risk to engineering structures from geohazards is determined by changing natural conditions in the permafrost zone. Risk assessment by statistical methods directly is accompanied by certain difficulties. Accumulation of statistics requires a significant amount of time, and this time is often comparable to the time of engineering structure operation. The most difficult stage of risk assessment is the assessment of the probability of damage to engineering structures caused by a hazardous geological process. The aim of the study was to substantiate the method for solving this problem on the territory of thermokarst plains with fluvial erosion for linear engineering structures using the methods of mathematical landscape morphology. Mathematical landscape morphology allows us to proceed to the quantitative risk assessment. The first step of applying methods of mathematical landscape morphology is to divide the area into homogenous by the process development sections. The method is based on the model that was proposed by the authors for the development of the morphological structure of thermokarst plains with fluvial erosion under conditions of an asynchronous start, which is realized according to empirical verification in most of cases. The model of risk assessment was applied to 4 key areas located under different physico-geographical conditions, but having morphological homogeneity. Using satellite images of different periods, the delineation of thermokarst lakes and khasyreys was carried out. The average density of the number of lesions in different areas varies from 0.00026 year⁻¹ to 0.00104 year⁻¹, and there is no clear trend of change with time. According to quantitative experimental data, there has been a site-differentiated change in the risk of damage to linear structures within the thermokarst plains with fluvial erosion over the past few decades (46–56 years). The probability of damage to linear engineering structures has changed significantly in plot 35 (Yano-Indigirskaya lowland), which confirms the chi-square test. The probability of defeat increased by 6–9 times according to the estimates obtained. This situation is observed when the lengths of linear structures are 3–4 km. However, in most of the key areas, there is no significant change in the probability of damage, despite ongoing climate change.

Keywords: *cryolithozone, thermokarst, mathematical model, morphological structure, geological hazards, risk assessment*

REFERENCES

1. Victorov, A.S., Trapeznikova, O.N., Orlov, T.V., Sadkov, S.A. *Ispol'zovanie podkhodov matematicheskoi morfologii landshafta pri distantsionnoi otsenke prirodnykh opasnostei* [Application of mathematical morphology of landscapes approach to remote estimation of natural hazards]. *Geoekologiya*, 2019, no. 5, pp. 61–73. (in Russian)
2. Elkin, V.A. *Regional'naya otsenka karstovoi opasnosti i riska (na primere Respubliki Tatarstan)* [Regional assessment of karst hazard and risk (by the example of the Republic of Tatarstan)]. Extended abstract of Cand. Sci. (Geol.-Min.) dissertation. Moscow, IEG RAS. 2004, 24 p. (in Russian)
3. Kramer, G. *Matematicheskie metody statistiki* [Mathematical methods in statistics]. Moscow, Mir Publ., 1970, 648 p. (in Russian).
4. Osipov, V.I. *Prirodnye opasnosti i strategicheskie riski v mire i v Rossii* [Natural hazards and strategic risks in the

- world and in Russia]. *Ekologiya i zhizn'*, 2009, vol. 11–12 (96–97), pp. 5–15. (in Russian)
5. *Otsenka i upravlenie prirodnymi riskami* [Assessment and management of natural risks]. *Mater. Vseros. konf. "Risk-2003"* [Proc. All-Russia Conf. Risk-2003], Moscow, RUDN Publ., 2003, vol. 1, 412 p. (in Russian)
 6. *Otsenka i upravlenie prirodnymi riskami* [Assessment and management of natural risks]. A.L. Ragozin, Ed. Moscow, "KRUK" Publ., 2003, 320 p. (in Russian)
 7. Ragozin, A.L. *Osnovnye položeniya teorii opasnykh geologicheskikh protsessov i riskov* [Principal statements of the theory on geological hazards and risks]. *Novye idei v nauках o Zemle. Tez. dokl. III Mezhd. konf.* [New ideas in the Earth sciences. Proc. 3rd Intern. Conf.] Moscow, 1997, vol. 4, p. 115. (in Russian)
 8. Victorov, A., Orlov, T., Kapralova, V., Trapeznikova, O. The morphological pattern development of thermokarst plains with fluvial erosion: stochastic modeling for risk assessment. In: International multidisciplinary scientific GeoConference "Surveying, Geology and Mining, Ecology, Management" SGEM-2019. 2019, vol. 19, issue 1.2, pp. 531–541.
 9. Victorov, A.S., Orlov, T.V., Trapeznikova, O.N., Kapralova, V.N., Arkhipova, M.V. Regularities of the distribution of lake areas on thermokarst plains with fluvial erosion, *Doklady Earth Sciences*. 2020, vol. 491, no. 2, pp. 282–284.