ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2020, № 3, с. 82–90

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 504.064.37

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РИСКА ПОРАЖЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИНИЦИИРОВАННЫМИ ТЕРМОКАРСТОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

© 2020 г. А. С. Викторов[1,*], М. В. Архипова[1], В. Н. Капралова[1], Т. В. Орлов[1]

[1] *Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр.2, Москва, 101000 Россия*

**E-mail: vic_as@mail.ru*

Поступила в редакцию 24.12.2019 г.
После доработки 24.12.2019 г.
Принята к публикации 25.12.2019 г.

Статья посвящена решению проблемы дистанционной количественной оценки риска поражения линейных сооружений. Основой решения является совокупность математических моделей развития природных и антропогенно-инициированных термокарстовых процессов для линейных сооружений, описывающая развитие комплекса очагов инициированного термокарста, возникающих в полосе вдоль линейных сооружений. Анализ моделей позволил предсказать пуассоновское распределение числа поражений отрезков линейного сооружения, связь параметров поражения с параметрами комплекса очагов и дать выражение для вероятности поражения сооружения заданной длины. Полученные результаты эмпирически проверены на ряде участков севера Западной Сибири, Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Ключевые слова: *математическая морфология ландшафта*, *инициированный термокарст*, *линейное сооружение*

DOI: 10.31857/S0869780920030108

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных и интересных проблем является оценка риска поражения инженерных сооружений опасными экзогенными процессами. Этим исследованиям посвящено много работ [1, 5, 7–9 и др.], однако в большинстве выполненных исследований существующие подходы к ее решению, базирующиеся на накоплении статистических данных, не вполне исчерпывают имеющиеся вопросы в силу следующих обстоятельств:

– оценка рисков необходима на стадии проектирования, когда линейное сооружение не реализовано и, соответственно, статистика отсутствует;

– использование объектов-аналогов имеет весьма ограниченные возможности, так как необходимо, чтобы аналогичными были не только объект, но и ландшафтные, и инженерно-геокриологические условия;

– дается лишь качественная оценка вероятности поражения инженерного сооружения, в то время как для проекта интересна количественная оценка.

Это приводит к необходимости поиска новых подходов к оценке вероятности поражения линейных сооружений, которая является, строго говоря, оценкой опасности, но вместе с тем представляет собой один из основных и наиболее близких к естественным наукам элементов оценки риска.

Цель настоящего исследования – показать метод количественной оценки вероятности поражения линейного инженерного сооружения инициированными термокарстовыми процессами.

Пусть строительство сооружения, созданная инфраструктура (вдоль трассовые дороги, линии электропередач, связи и т.д.) и воздействие самого сооружения привели к инициации термокарстового процесса (рис. 1).

Возникает вопрос о количественной оценке вероятности поражения инженерного сооружения опасными экзогенными процессами без длительных стационарных наблюдений, только на основе материалов дистанционных съемок.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой решения задачи может быть разработанная нами ранее [2, 3] модель инициированного термокарста в полосе линейного сооружения, основанная на подходах математической морфологии ландшафта.

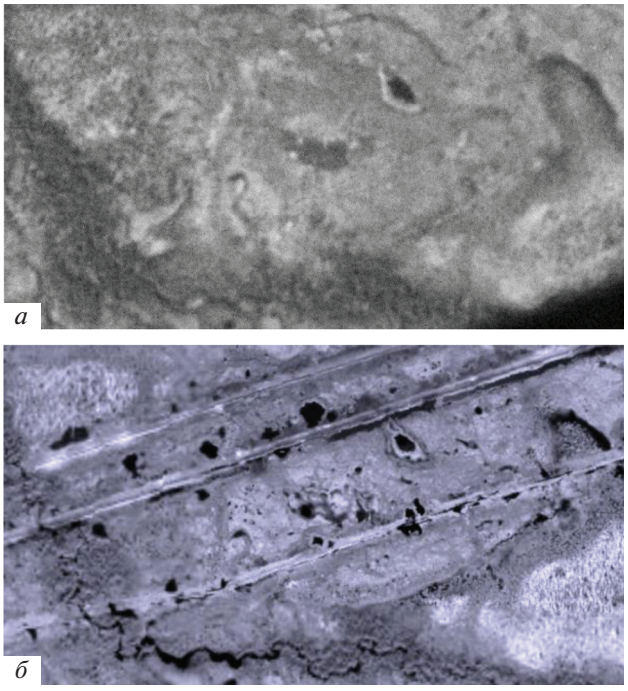

Рис. 1. Развитие термокарстового процесса при строительстве линейного сооружения: *а* – до строительства, космическая съемка Corona, 2.5 м/пикс., 1961 г.; *б* – после строительства, космическая съемка Digital Globe, WorldView 1, 0.5 м/пикс., 2012 г.

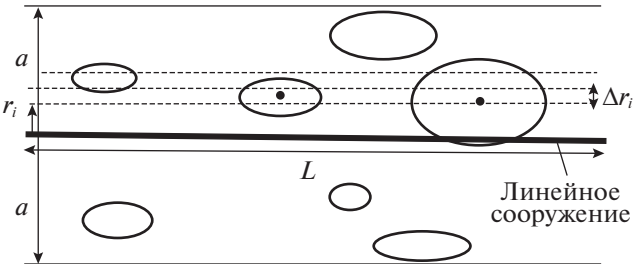

Рис. 2. Схема оценки вероятности поражения инициированным термокарстовым процессом в зоне линейных сооружений; эллипсы – термокарстовые очаги, точки – центры очагов в полосе Δr_i, пунктиры – границы полос. Пояснения в тексте.

Модель инициированного термокарстового процесса (общий случай) базируется на следующих допущениях:

1. Возникновение термокарстовых понижений происходит в ограниченной полосе (ширина *a*, рис. 2), прилегающей к линейному сооружению; возникновение термокарстовых понижений происходит независимо друг от друга, и вероятность возникновения понижения на данной площадке определяется только величиной площадки (Δs)[1] и удаленностью от линейного сооружения:

$$p(r, \Delta s) = \lambda(r)\Delta s + o(\Delta s),$$

где $\lambda(r)$ – коэффициент.

2. Очаг инициированного термокарста в зоне линейного сооружения можно приблизительно рассматривать как эллипс с соотношением длин полуосей (ξ_i, i – год), которое имеет постоянное вероятностное логнормальное распределение и независимо меняется год от года:

$$\beta = \xi_i \alpha,$$

где α и β – длины полуосей.

3. Рост линейных размеров термокарстовых понижений (полуосей эллипса) благодаря термоабразионному воздействию[2] происходит независимо от других понижений, и он прямо пропорционален плотности тепловых потерь через боковую поверхность понижения, залитую водой.

Таким образом, нами рассматривается вариант синхронного старта, когда процесс появления первичных понижений происходит за короткий промежуток времени после начала строительства линейного сооружения.

Первое предположение вытекает из однородности рассматриваемой территории и отражает то, что на любой ограниченной площадке наблюдается лишь конечное число термокарстовых понижений (точнее – их центров). Кроме того, в этом допущении учитывается характер нарушений (почвенно-растительного покрова, микрорельефа, геокриологических условий) в зоне линейного сооружения, приводящих к развитию термокарста. Он меняется в зависимости от расстояния до линейного сооружения и в общем сохраняется при движении параллельно сооружению, т.е. основным направлением изменчивости условий возникновения термокарста является направление, перпендикулярное сооружению. Это учитывается в виде функции $\lambda(r)$, зависящей от расстояния до сооружения.

Второе предположение также представляется справедливым. Оно сводится к пропорциональности скорости роста размера термокарстового очага средней плотности тепловых потерь через залитую водой боковую поверхность, при этом на рост влияет и множество случайных факторов (средняя годовая температура воздуха, льдистость пород в окрестностях озера и др.).

Математический анализ допущений позволяет, как показано в работах [3, 4], получить ряд выводов, которые могут служить основой решения задачи:

[1] При этом для малых площадок вероятность возникновения одного понижения много больше, чем вероятность возникновения нескольких понижений.

[2] Возможна и низкая интенсивность термоабразии, при этом процесс приближается к “чисто термокарстовому”.

– процесс роста полуосей инициированных термокарстовых форм можно рассматривать как марковский случайный процесс с непрерывным временем (точнее винеровский процесс по отношению к логарифмам длин полуосей);

– в любой момент времени должно наблюдаться логнормальное распределение длин полуосей термокарстовых форм с несколько отличными значениями параметров;

– в любой момент времени должно наблюдаться логнормальное распределение площадей форм инициированного термокарста;

– в любой зоне (полосе), удаленной на определенное расстояние от линейного сооружения, распределение числа центров форм инициированного термокарста должно подчиняться распределению Пуассона;

– распределение расстояний между проекциями центров термокарстовых понижений на линейное сооружение должно подчиняться экспоненциальному распределению, а их количество на пробном отрезке – пуассоновскому распределению.

Оценка вероятности поражения линейного сооружения термокарстовыми процессами для транспортно-коммуникационных сетей может быть получена на основе математического анализа модели со следующими основными элементами (см. рис. 2):

– разделение полосы линейного сооружения на зоны, параллельные оси сооружения небольшой ширины Δr_i;

– получение вероятности поражения линейного сооружения одним термокарстовым понижением из i-й зоны, которая равна вероятности того, что полупроекция[3] очага на направление перпендикулярное линейному сооружению больше расстояния от зоны до сооружения (r_i):

$$-\alpha = 1 - F(r_i),$$

где $F(r_i)$ – распределение величины полупроекции термокарстового понижения на направление перпендикулярное линейному сооружению;

– получение на основе закона Пуассона вероятности наличия k понижений в i-й зоне и вероятности числа поражений v_i линейного сооружения термокарстовыми понижениями из i-й зоны, сначала при данном k:

$$P_i^0(v_i|k) = (1-\alpha)^{k-v_i}\alpha^{v_i}\binom{k}{v_i}\frac{[\lambda(r_i)\Delta r_i L]^k}{k!}e^{-\lambda(r_i)\Delta r_i L},$$

а затем при любом k:

$$P_i^1(v_i) = \sum_{k=v_i}^{+\infty}(1-\alpha)^{k-v_i}\alpha^{v_i}\binom{k}{v_i}\frac{[\lambda(r_i)\Delta r_i L]^k}{k!}e^{-\lambda(r_i)\Delta r_i L},$$

где $\lambda(x)$ – средняя плотность расположения термокарстовых понижений на расстоянии x от линейного сооружения;

– обоснование путем упрощения полученного выражения, что v_i также будет подчиняться закону Пуассона:

$$P_i^1(v_i) = \frac{[\lambda(r_i)[1-F(r_i)]\Delta r_i L]^{v_i}}{v_i!}e^{-\lambda(r_i)[1-F(r_i)]\Delta r_i L},$$

соответственно с математическим ожиданием

$$\gamma_i \approx \lambda(r_i)\Delta r_i L[1-F(r_i)];$$

– при суммировании числа поражений по всем полосам с учетом двусторонней окрестности сооружения сумма независимых, распределенных по закону Пуассона случайных величин, также будет распределена по этому закону;

– нахождение математического ожидания суммарного числа поражений v, которое находится как сумма математических ожиданий для каждой полосы, т.е. точно может быть найдено как предел суммы математических ожиданий при числе полос, стремящемся к бесконечности, а ширины – к 0, т.е., для отрезка единичной длины как интеграл:

$$I = 2\int_0^a \lambda(x)[1-F(x)]dx,$$

где a – ширина полосы (односторонняя).

В итоге получаем, что распределение числа поражений отрезка линейного сооружения длиной L отвечает распределению Пуассона:

$$P_d(k,L) = \frac{[IL]^k}{k!}e^{-IL},$$

где $I = 2\int_0^a \lambda(x)[1-F(x)]dx$.

Отсюда следует, что вероятность поражения отрезка длиной L хотя бы одним очагом термокарстового процесса:

$$P_d(L) = 1 - \exp\left[-2L\int_0^a \lambda(x)[1-F(x)]dx\right].$$

В наиболее простом случае, когда $\lambda(x) = \lambda_0 = \text{const}$, оценка вероятности поражения с учетом того, что сумма математических ожида-

[3] Под полупроекцией в рамках настоящей статьи названа часть проекция формы инициированного термокарста на соответствующую ось, начинающаяся от проекции центра формы.

ний полупроекций равна матаматическому ожиданию проекции, приобретает вид:

$$P_d(L) = 1 - \exp(-\lambda_0 L\overline{pr}),$$

где $\overline{pr}$ – средняя величина проекции термокарстового понижения на направление перпендикулярное линейному сооружению.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Следующий этап – эмпирическая проверка метода оценки вероятности поражения линейного сооружения инициированными термокарстовыми процессами.

Эмпирической проверке подвергались главнейшие результаты разработки метода оценки вероятности поражения линейного сооружения термокарстовыми очагами, включающие следующие элементы:

– распределение числа поражений отрезка заданной длины отвечает распределению Пуассона;

– соответствие эмпирической частости и теоретической вероятности поражения отрезка линейного сооружения заданной длины хотя бы одним очагом термокарстового процесса.

Под поражением линейного сооружения термокарстовым очагом принималось пересечение или касание очагом небольшой окрестности сооружения (принято 6 м от оси – зона поражения). В этой окрестности тепловой режим является уже значительно нарушенным линейным сооружением, и “заход” в него термокарстового очага с высокой вероятностью должен привести к его интенсивному развитию и созданию предпосылок нарушения штатной работы транспортно-коммуникационной сети.

Расчетная вероятность поражения помимо “захода” в нее очагов, центры которых лежат вне зоны поражения, учитывает еще поражение очагами, чьи центры находятся внутри зоны поражения, базируется согласно модели на пуассоновском распределении числа очагов. С учетом сказанного, выражение для теоретической вероятности принимает следующий вид

$$P_d(L) = 1 - \exp(-\lambda_0 L\overline{pr} - \lambda_1 S_d(L)),$$

где λ_1 – средняя плотность расположения термокарстовых очагов в зоне поражения, λ_0 – средняя плотность расположения термокарстовых очагов в зоне, прилегающей к зоне поражения (зона анализа), $S_d(L)$ – площадь зоны поражения, соответствующая отрезку линейного сооружения длиной L (без узкой полосы собственно сооружения, на поверхности которого проявления очагов не возникает).

То же относится и к пуассоновскому распределению числа поражений. Учет очагов, центры которых находятся внутри зоны поражения, как показывает анализ, не меняют пуассоновского характера распределения числа поражений, а влияют только на значение параметра (среднее число поражений). В силу сказанного процедура эмпирической проверки в этом случае не меняется.

Эмпирическая проверка пуассоновского характера распределения числа поражений базировалась на дешифрировании понижений инициированного термокарста на космических снимках высокого разрешения, разбиении сооружения на отрезки заданной длины и подсчете числа поражений; это повторялось для отрезков разбиений разной длины. Далее по традиционной методике (например, [6]) на основе критерия Пирсона сравнивалось эмпирическое распределение числа поражений и теоретическое распределение Пуассона.

Порядок эмпирической проверки теоретической вероятности поражения отрезка линейного сооружения заданной длины включал разбиение сооружения на отрезки заданной длины, подсчет числа поражений, определение значений необходимых параметров, расчет теоретических вероятностей и эмпирических частостей и сравнение теоретических и эмпирических распределений. Это было выполнено для разных длин отрезков.

Для исследования выбраны участки разнообразные в геоморфологическом, геокриологическом и физико-географическом отношении, расположенные в различных регионах – Ямал, Западно-Сибирская низменность, Восточная Сибирь (рис. 3).

Были использованы следующие материалы космической съемки: архивные снимки Corona (3–12 м/пикс., 1965–1976 гг.); современные снимки (IKONOS, QuickBird, Worldview 2, Geoeye-1, Pleidas, SPOT-5, SPOT-6, 0.5–2.5 м/пикс., июнь–август 2008–2014 гг.), как специально приобретенные (ИТЦ СКАНЭКС), полученные в виде грантов Digital Globe, Tandem X, так и полученные из открытых источников.

Проверка пуассоновского распределения осуществлена для 19 выборок на 7 участках. Анализ показывает хорошее соответствие. На рис. 4 приведены примеры соответствия графиков эмпирического распределения числа поражений и теоретического пуассоновского для разных участков.

Использование критерия Пирсона для оценки соответствия эмпирического распределения числа поражений и теоретического пуассоновского для разных участков также показало хорошее согласие с гипотезой (табл. 1). Полученные данные

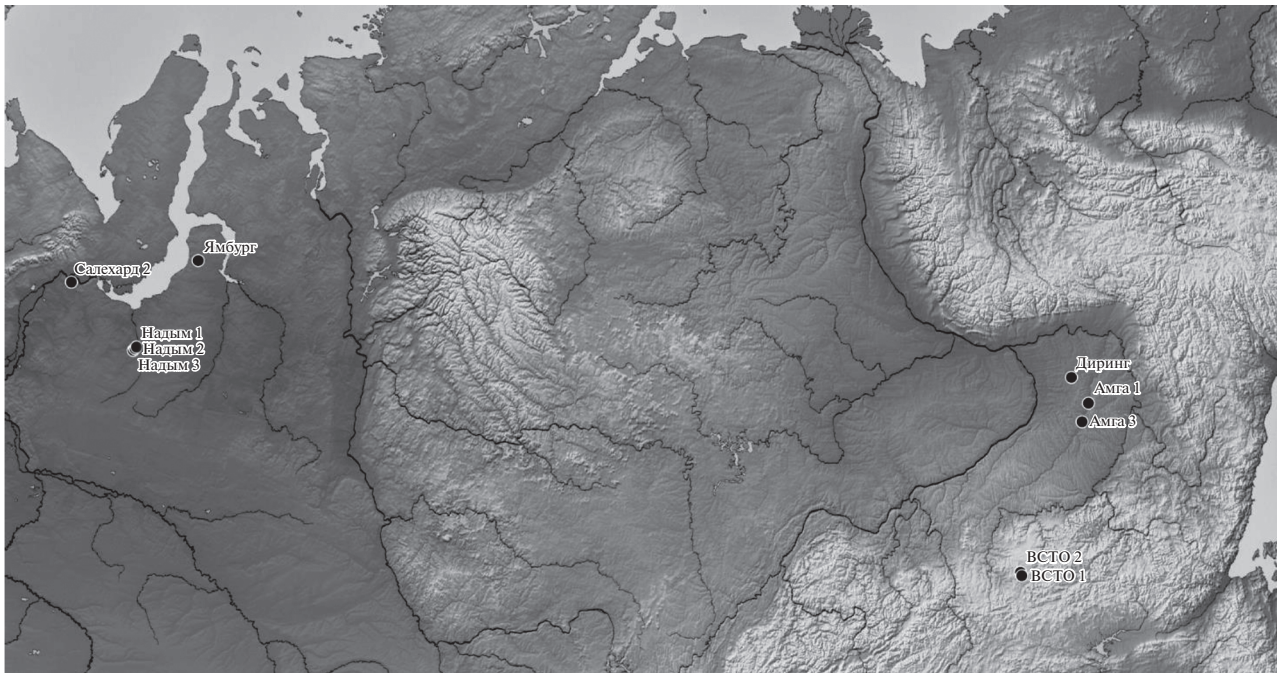

Рис. 3. Схема расположения ключевых участков при проверке модели инициированного термокарста.

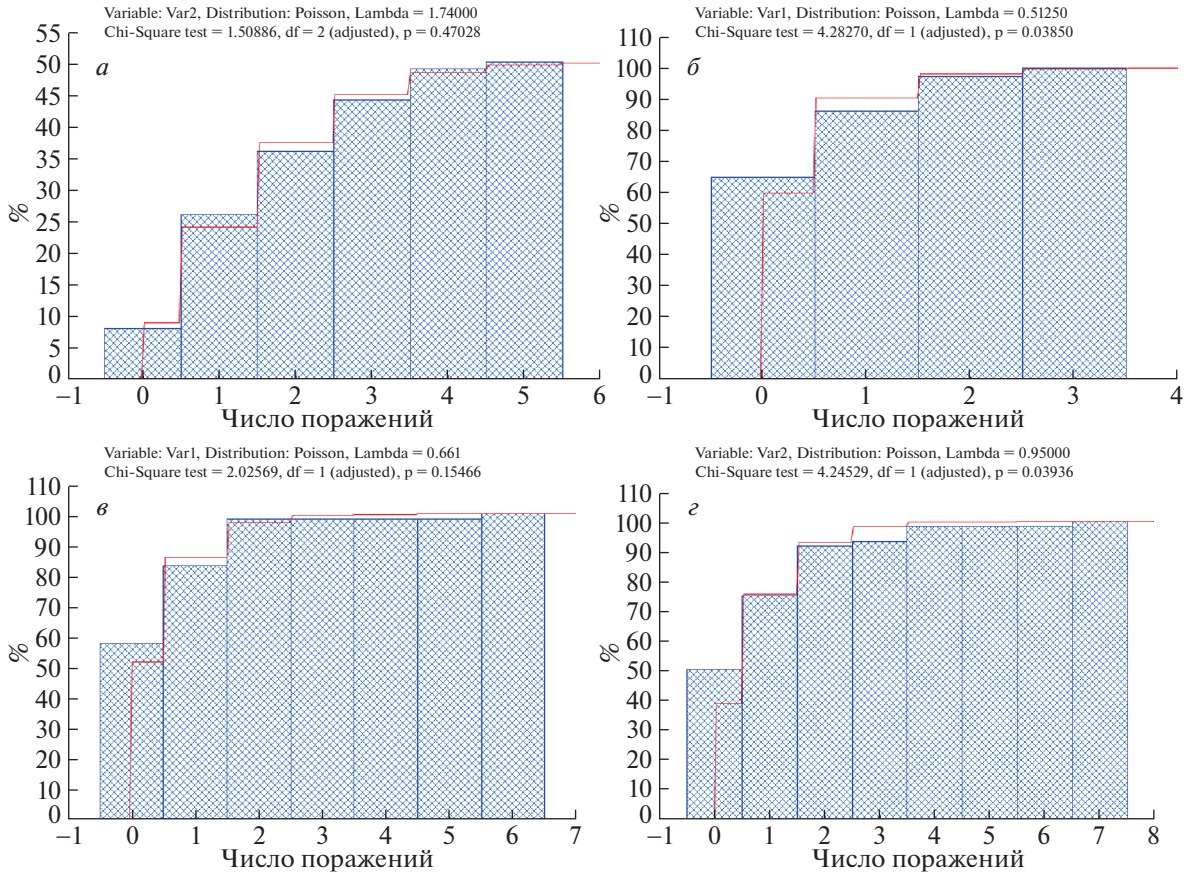

Рис. 4. Примеры соответствия графиков эмпирического распределения числа поражений и теоретического пуассоновского для разных участков: *а* – Амга 1, длина фрагмента 250 м; *б* – Амга 3, длина фрагмента 250 м; *в* – ВСТО 2, длина фрагмента 35 м; *г* – Диринг, длина фрагмента 300 м.

Таблица 1. Согласие эмпирического распределения числа поражений линейного сооружения с распределением Пуассона

Участок	Длина фрагмента, м	Объем выборки	Среднее	*p*-уровень
Амга 3	250	80	0.513	**0.038**
	350	60	0.633	**0.379**
Амга 1	250	70	1.386	**0.629**
	350	50	1.740	**0.470**
ВСТО 2	35	59	0.661	**0.154**
Салехард 2, съемка 2016 г.	25	186	1.134	**0.015**
	50	93	1.989	0.000
	100	51	3.765	0.000
Салехард 2, съемка 2012 г.	25	186	0.559	**0.302**
	50	93	0.946	**0.044**
	100	51	1.784	0.000
Диринг	300	101	0.50	**0.013**
	500	60	0.95	**0.039**
Надым 1 нитка 1, съемка 2018 г.	50	73	0.79	**0.005**
Надым 1 нитка 2, съемка 2018 г.	50	73	0.87	**0.039**
Надым 1 нитка 3, съемка 2018 г.	50	70	0.62	**0.500**
Надым 1 нитка 5, съемка 2018 г.	50	54	0.83	**0.115**
Надым 1 нитка 6, съемка 2018 г.	50	55	0.74	**0.418**
Надым 3 нитка 1, съемка 2018 г.	40	53	0.90	**0.389**
Надым 3 нитка 2, съемка 2018 г.	40	52	1.42	**0.425**

Жирным шрифтом выделены выборки с согласием с распределением Пуассона на уровне значимости 0.99.

по случайному выбору фрагментов линейного сооружения включали выборки объема от 50 до 186. На 16 выборках и всех участках гипотеза подтверждается на уровне значимости 0.99.

Проверка теоретической вероятности поражения линейного сооружения эмпирическим частостям осуществлена на 11 выборках. На рис. 5 графически показано соответствие расчетной веро-

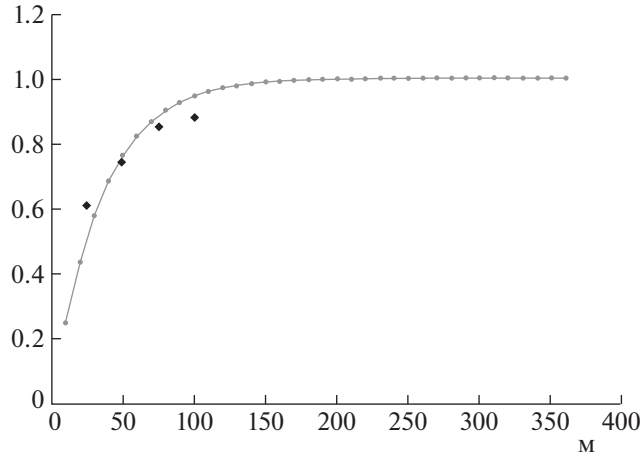

Рис. 5. Соответствие расчетной вероятности (линия) для разной длины фрагментов разбиения и эмпирическими частостями (темные квадраты) для участка Салехард 2.

Таблица 2. Соответствие эмпирической частости поражения линейного сооружения и теоретической расчетной вероятности

Участок	Длина фрагмента линейного сооружения, м	Объем выборки	Эмпирическая частость поражения	Теоретическая вероятность поражения
Амга 3	250	80	0.35	0.27
	350	60	0.43	0.35
	500	40	0.75	0.46
ВСТО 2	35	59	0.44	0.52
	50	41	0.49	0.66
Салехард 2	25	186	0.61	0.53
	50	93	0.74	0.78
	75	62	0.85	0.89
	100	51	0.88	0.94
ВСТО 21	25	66	0.62	0.59
	35	47	0.23	0.10

ятности для разной длины фрагментов разбиения и эмпирическими частостями для участка Салехард 2.

В табл. 2 приведены данные по соответствию эмпирической частости поражения линейного сооружения и теоретической расчетной вероятности для всех участков, привлеченных для анализа.

Гипотеза показывает, что теоретические вероятности близки к эмпирическим частостям в 9 случаях из 11. Полученные данные по случайному выбору фрагментов линейного сооружения включали выборки объема от 41 до 186.

Полученные результаты могут быть использованы при дистанционной оценке опасности. С учетом полученных данных процедура оценки опасности должна содержать следующие основные элементы:

– выполнение повторной двукратной дистанционной съемки;

– определение по каждому сроку значений параметров: среднего логарифма проекции термокарстового понижения на направление перпендикулярное линейному сооружению, стандарта этой проекции, средней плотности расположения озер в зоне анализа;

– расчет прогнозных значений этих же параметров на основании линейного роста логарифма и дисперсии логарифма проекции и линейного роста плотности расположения озер (или постоянства плотности – в зависимости от сценария);

– расчет вероятности поражения линейного сооружения (фрагмента заданной длины) на прогнозный срок.

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, в результате проведенных исследований теоретически разработан и эмпирически проверен метод оценки вероятности поражения линейного сооружения инициированными термокарстовыми процессами для транспортно-коммуникационных сетей.

2. Получены закономерности поражения линейного сооружения инициированными термокарстовыми процессами.

3. Определены основные элементы процедуры количественной прогнозной оценки опасности поражения линейного сооружения инициированными термокарстовыми процессами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РГО-РФФИ № 17-05-41141 и в рамках государственного задания по теме № г.р. АААА-А19-119022190077-6 в части оценки природной опасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алешин А.С., Торгоев И.А., Шикерук А.Н. и др.* Долговременные аспекты оползневого прогнозирования // Сергеевские чтения. Вып. 15. 2013. С. 96–101.
2. *Викторов А.С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
3. *Викторов А.С., Орлов Т.В., Дорожко А.Л., Зверев А.В.* Развитие модели инициированных термокарстовых процессов для дистанционной оценки природной опасности // Геоэкология. 2019. № 2. С. 68–76.
4. *Викторов А.С., Орлов Т.В., Капралова В.Н., Дорожко А.Л.* Модель развития инициированных термокарстовых процессов в зоне линейных сооружений (на основе подходов математической морфологии ландшафта) // Геоэкология. 2018. № 5. С. 87–96.
5. *Елкин В.А.* Региональная оценка карстовой опасности и риска (на примере Республики Татарстан): автореф. дисс. .... канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЭ РАН, 2004. 24 с.
6. *Кремер Н.Ш.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.
7. Опасные природные процессы / Под ред. В.И. Осипова. М.: ГЕОС, 1999. 290 с.
8. *Рагозин А.Л.* Современное состояние и перспективы оценки и управления природными рисками в строительстве // Анализ и оценка природного и техногенного риска в строительстве. М.: ПНИИИС, 1995. С. 9–25.
9. *Хоменко В.П.* Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.

MATHEMATICAL MODEL FOR RISK OF DAMAGE TO ENGINEERING STRUCTURES BY HUMAN-INDUCED THERMOKARST PROCESSES

A. S. Victorov[a,#], M. V. Arkhipova[a], V. N. Kapralova[a], and T. V. Orlov[a]

[a] *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

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

The paper deals with solving problem on the remote quantitative impact risk assessment for linear structures. The problem solution is based on a set of mathematical models of natural and thermokarst development for linear structures, describing an assemblage of developing human-induced thermokarst foci in the vicinity of linear structures. The analysis of the models allows us to predict the Poisson distribution for a number of affected sections of a linear structure, the correlation of the lesion parameters with the parameters of the complex of thermokarst foci, and to deduce a probability equation for a structure of a given length affected by the human-induced thermokarst process. We tested the obtained results at some plots within the north of Eastern and Western Siberia and the Far East.

Keywords: *mathematical morphology of landscape*, *human-induced thermokarst*, *a linear structure*

REFERENCES

1. Aleshin, A.S., Torgoev, I.A., Shikeruk, A.N., et al. *Dolgovremennye aspekty opolznevogo prognozirovaniya* [Long-term aspect of landslide prediction]. *Sergeevskie chteniya, Vypusk 15* [Sci. conference in commemoration of academician E.M. Sergeev, issue 15], 2013, pp. 96–101. (in Russian)
2. Victorov, A.S. *Osnovnye problemy matematicheskoi morfologii landshafta* [The general problems of the mathematical morphology of landscapes]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 252 p. (in Russian)
3. Victorov, A.S., Orlov, T.V., Dorozhko, A.L., Zverev, A.V. *Razvitie modeli initsiirovannykh termokarstovykh protsessov dlya distantsionnoi otsenki prirodnoi opasnosti* [Development of the induced thermokarst model for the remote assessment of natural hazard]. *Geoekologiya,* 2019, no. 2, pp. 68–76. (in Russian)
4. Victorov, A.S., Orlov, T.V., Kapralova, V.N., Dorozhko, A.L. *Model' razvitiya initsiirovannylkh termokarstovykh protsessov v zone lineinykh sooruzhenii (na osnove podkhodov matematicheskoi morfologii landshafta)* [Development model of initiated thermokarst processes in the zone of linear structures (based on the approaches of mathematical morphology of landscapes)]. *Geoekologiya,* 2018, no. 5, pp. 87–96. (in Russian)

5. 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 Tatarstan Republic]. Extended abstract Cand. Sci. (Geol-Min.) Diss. Moscow, IEG RAS, 2004, 24 p. (in Russian)

6. Kremer, N.Sh. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* [Theory of probability and mathematical statistics]. Moscow, UNITI-DANA Publ., 2004, 573 p. (in Russian)

7. *Opasnye prirodnye protsessy* [Hazardous natural processes]. Osipov, V.I., Ed. Moscow, GEOS Publ., 1999, 290 p. (in Russian)

8. Ragozin, A.L. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy otsenki i upravleniya prirodnymi riskami v stroitel'stve* [The current state and prospects of assessment and management of natural risks in construction]. *Analiz i otsenka prirodnogo i tekhnogennogo riska v stroitel'stve* [Analysis and assessment of natural and technological risk in construction]. Moscow, PNIIIS, 1995, pp. 9–25. (in Russian)

9. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffozionnykh protsessov* [Regularities and prediction of suffusion processes]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian)