

УДК 502/504

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ИНИЦИИРОВАННЫХ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ПРИРОДНОЙ ОПАСНОСТИ¹

© 2019 г. А. С. Викторов^{1,*}, Т. В. Орлов^{1,**}, А. Л. Дорожко¹, А. В. Зверев²

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

*E-mail: vic_as@mail.ru

**E-mail: dist@geoenv.ru

²Московский государственный университет геодезии и картографии,
Гороховский пер., 4, Москва, 105064, Россия

Поступила в редакцию 4.12.2018 г.

В работе используется вероятностный подход к моделированию развития термокарстовых процессов в зоне линейного инженерного сооружения. Доработана модель, опубликованная ранее. Определены математические закономерности для двух полуосей термокарстового очага (длин проекций на инженерное сооружение и его перпендикуляр). Аналитически получены закономерности, которые должны выполняться при справедливости предложенной модели – длины проекций на инженерное сооружение и на перпендикуляр к оси сооружения должны подчиняться логнормальному закону распределения, отношение длин проекций между собой должны иметь статистически значимую корреляцию и также подчиняться логнормальному закону распределения. Проведена проверка предложенной модели для пяти участков на территории Восточной Сибири, на примере которых подтверждена ее справедливость. Предложенную модель можно использовать при дистанционной оценке опасности и анализа рисков для линейных сооружений в зоне многолетнемерзлых пород.

Ключевые слова: термокарст, дистанционное зондирование, трубопровод, дорога, вероятностное моделирование, оценка природной опасности, оценка риска.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019268-76>

ВВЕДЕНИЕ

Развитие подходов дистанционной оценки опасности экзогенных процессов для линейных сооружений, особенно в Сибири и на Дальнем Востоке, – одна из наиболее актуальных задач [6, 9, 11, 12]. Термокарстовые процессы относятся к числу наиболее распространенных источников природной опасности применительно к линейным сооружениям. Возникающие проблемы приводят к необходимости поиска новых подходов к оценке вероятности поражения линейных сооружений, т.е. к оценке природной опасности. Одним из возможных решений является математическое моделирование термокарстовых процессов [10, 13–16], но полноценное моделирование

термодинамических процессов с учетом фазовых переходов отличается значительной сложностью. В последнее время был развит подход к моделированию инициированного термокарста позиций математической морфологии ландшафта [5, 7, 17]. Однако предложенная в [17] модель обладала некоторыми недостатками. В частности, она описывала пространственное распределение очагов и изменение их площадей, в то время как для оценки вероятности поражения линейного сооружения важны линейные размеры очагов и их положение относительно сооружения, так как очаги инициированного термокарста, как правило, имеют не круговую, а более сложную форму.

Цель настоящей работы – совершенствование предложенной ранее модели развития инициированных термокарстовых процессов в зоне линейных сооружений на основе подходов математической морфологии ландшафта.

В данном исследовании рассматриваются термокарстовые процессы в полосе, прилегающей

¹ Исследование выполнено в рамках госзадания по теме «Опасные эндогенные и экзогенные процессы: факторы и закономерности их проявления, мониторинг и прогноз развития, оценка опасности и риска в условиях изменяющегося климата и техногенеза, разработка методов предотвращения и смягчения последствий природных и природно-техногенных катастроф» и при поддержке гранта РГО-РФФИ № 17-05-41141.

к сооружению, и не рассматриваются процессы непосредственно под сооружением, возникшие благодаря его термическому воздействию на грунт.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Общие подходы к моделированию остаются аналогичными подходам к моделированию для структуры озерно-термокарстовых равнин, находящихся в естественном состоянии [1–4]. Однако, модель существенно адаптируется для случая антропогенно-иницированного термокарста.

Рассмотрим пологоволнистую поверхность с развитием многолетнемерзлых пород с однородными физико-географическими и геокриологическими условиями, в пределах которой расположено линейное сооружение. Почвенно-растительный покров, особенности рельефа и микрорельефа определяются конкретным ландшафтом, к которому относится рассматриваемый участок. Допустим, что строительство сооружения, созданная инфраструктура (вдоль-трассовые дороги, линии электропередач, связи и т.д.) и воздействие самого сооружения привели к инициации термокарстового процесса.

Создаваемая модель относится к случаю участка с однородными физико-географическими и геокриологическими условиями. Под однородностью мы подразумеваем прежде всего однотипность рельефа, постоянный вещественный состав отложений, слагающих поверхность, и подстилающих отложений, сохраняющаяся на протяжении всего участка мощность поверхностных отложений, отсутствие погребенных ложбин, отсутствие тектонических нарушений, нахождение в пределах одной тектонической структуры, относительно однородные геокриологические условия. Естественно в модели не предполагается абсолютная однородность, а лишь статистическая.

Таким образом, модель не охватывает значительный ряд случаев развития термокарстового процесса, например случай развития термокарста по полигональной сети, продиктованного вторично-жильными льдами.

При создании модели мы придерживаемся представлений о развитии термокарстового озера, основанных на результатах ряда геокриологических исследований [10, 13]. В начальном развитии озера можно условно выделить две неравноценные стадии. На первой стадии оно представляет собой понижение, возникшее под действием случайных факторов, инициирующих термокарстовый процесс (скопление в первичном понижении воды с мощностью, превышающей некоторое критическое значение; локальное нарушение теплового баланса за счет строительных работ или

скопления снега и т.д.). Форма озера на этой стадии может быть весьма разнообразной.

На второй стадии озеро уже приобретает характерные для инициированного термокарста морфологические особенности термокарстового озера: в рассматриваемых однородных условиях это вытянутые очертания, близкие к овалам, реже более изометричные [8].

Первая стадия относительно короткая. Модель относится преимущественно ко 2-й стадии, которая по длительности является основной, и на которой проявляются основные характерные черты морфологии. В основу модели положены подходы теории случайных процессов.

Модель инициированного термокарстового процесса базируется на следующих допущениях.

1. Возникновение термокарстовых понижений происходит в ограниченной полосе, прилегающей к линейному сооружению; возникновение термокарстовых понижений происходит независимо друг от друга, и вероятность возникновения на данной площадке определяется только ее величиной (Δs)² и удаленностью от линейного сооружения (r):

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

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 термоабразивному воздействию³ происходит независимо от других понижений, и он прямо пропорционален плотности тепловых потерь через боковую поверхность понижения, залитую водой.

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

² При этом для малых площадок вероятность возникновения одного понижения много больше, чем вероятность возникновения нескольких понижений.

³ Возможна и низкая интенсивность термоабразии, при этом процесс приближается к «чисто термокарстовому».

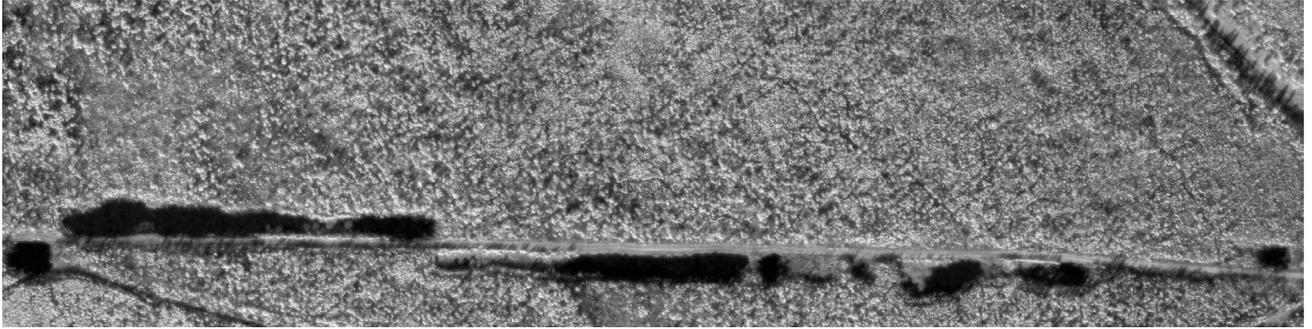


Рис. 1. Типичный вид на космическом снимке термокарстовых понижений, заполненных вод, возникших вдоль линейного сооружения.

На рис. 1 приведен космический снимок термокарстовых понижений, заполненных вод, возникших вдоль 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 тип нарушений (нарушения почвенно-растительного покрова, микрорельефа, геокриологических условий) в зоне линейного сооружения, приводящих к развитию термокарста. Он меняется в зависимости от расстояния от линейного сооружения и, в общем, сохраняется при движении параллельно сооружению, т.е. основное направление изменчивости условий возникновения термокарста – направление, перпендикулярное сооружению. Это учитывается в виде функции $\lambda(r)$, зависящей от расстояния до сооружения.

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

Математический анализ допущений позволяет получить ряд выводов. Так можно получить, что распределение числа центров термокарстовых понижений на заданной длине линейного сооружения (L) подчиняется распределению Пуассона:

$$P_0(k, L) = \frac{[\gamma L]^k}{k!} e^{-\gamma L}, \quad (1)$$

где γ – средняя линейная плотность расположения термокарстовых очагов.

Анализ этого выражения в свою очередь позволяет получить, что распределение расстояний

между центрами термокарстовых понижений вдоль линейного сооружения должно при условии справедливости модели отвечать экспоненциальному распределению.

Определим распределение длин полуосей. Если V – объем воды в понижении, который является комплексным результатом концентрации воды с водосбора, испарения и стока и других процессов формирования водного баланса, то глубина залитой водой части понижения⁴, с учетом выражения для площади эллипса $\mu = \pi\alpha\beta$ и пропорциональности полуосей α и β (допущение 2) $\beta = \xi_j\alpha$, составит в j -й год:

$$h_j = \frac{V}{\pi\xi_j u_j^2}.$$

В этом случае площадь боковой залитой водой поверхности составит:

$$S = \frac{V(\xi_j + 1)}{\xi_j u_j}, \quad (2)$$

где u_j – длина полуоси α к началу j -го года. Соответственно, из третьего предположения модели вытекает выражение:

$$\Delta u_j = \frac{ct^o V}{S} v_j^0,$$

где Δu_j – приращение длины полуоси α за j -й год, c – удельная теплоемкость, t^o – средняя температура воды, v_j^0 – случайная величина, учитывающая воздействие эпизодических факторов. Данное выражение после подстановки площади из выражения (2) и упрощения приобретает вид:

$$\Delta u_j = \frac{v_j \xi_j}{\xi_j + 1} u_j. \quad (3)$$

⁴ Понижение в целом принимается за цилиндр с эллиптической направляющей.

Соответственно, длины полуоси в последовательные годы имеют соотношение:

$$u_{j+1} = \left[1 + \frac{v_j \xi_j}{\xi_j + 1} \right] u_j,$$

и значит длина полуоси в j -ом году, если принять размер начального понижения за единицу, дается выражением:

$$u_j = \prod_{i=1}^j \left[1 + \frac{v_i \xi_i}{\xi_i + 1} \right]$$

или

$$\ln u_j = \sum_{i=1}^j \ln \left[1 + \frac{v_i \xi_i}{\xi_i + 1} \right].$$

Функции в правой части представляют собой случайные величины, учитывающие ход процесса деградации в конкретный год, обусловленный летними и зимними температурами, мощностью снегового покрова, объемом ливневого стока, температурами почвы, характером выпадения осадков и их количеством, льдистостью и грунтовыми условиями по направлениям полуосей и др. Эти функции для разных лет независимы, но одинаково распределены.

Поскольку сумма большего числа независимых, одинаково распределенных случайных величин, согласно центральной предельной теореме, распределена нормально, и, соответственно, нормально распределен логарифм длины полуоси, то отсюда следует, что процесс роста полуоси α иницированных термокарстовых форм при значительном J можно приближенно рассматривать как марковский случайный процесс с непрерывным временем с переходной функцией:

$$f_\alpha(v, x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x\sqrt{t}}} e^{-\frac{(\ln \frac{x}{v} - at)^2}{2\sigma^2 t}},$$

где a, σ – параметры распределения, v – начальный размер полуоси термокарстового понижения, x – размер полуоси понижения через время t .

Если предположить, что функции в правой части распределены по нормальному закону, то тот же вывод справедлив и для любого (пусть и небольшого) времени развития.

В случае если для упрощения модели мы примем, что первичные термокарстовые понижения в момент возникновения имеют единичную

длину полуоси α (это отвечает нормированию по минимальному значению), то отсюда следует, что в любой момент времени мы должны наблюдать логнормальное распределение длины полуоси α термокарстовых форм:

$$f_\alpha^0(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x\sqrt{t}}} e^{-\frac{(\ln x - at)^2}{2\sigma^2 t}},$$

где a, σ – параметры распределения, t – время, прошедшее с начала процесса.

Поскольку первая полуось и коэффициент пропорциональности ξ_i подчиняются логнормальному распределению и независимы, то и их произведение (вторая полуось β) также должно подчиняться логнормальному распределению, но с несколько отличным значением параметра α .

Наконец, с учетом квадратичной связи между площадью μ и длиной полуоси α

$$\mu_i = \pi \xi_i \alpha_i^2,$$

площадь понижения иницированного термокарста также должна подчиняться логнормальному закону распределения.

ЭМПИРИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА

Для ряда выводов полученных моделей была выполнена эмпирическая проверка. Первый этап заключался в выборе эталонных участков, на части из которых затем проводилась проверка. В основу выбора участков положены ландшафтная и морфологическая однородность и наличие линейного сооружения. Эмпирические проверки велись по участкам Амга-1, Амга-3, Диринг, Южно-Якутский участки (ВСТО-1, ВСТО-2) (рис. 2).

На каждый участок выполнен заказ материалов космической съемки, в том числе повторных. Заказ и получение пространственных данных был осуществлен из нескольких источников:

- космическая съемка Ресурс-П (РКС, НЦ ОМЗ), съемочное устройство СППИ «Сангур-1У»;
- космическая съемка компании Digital Globe получена по гранту DigitalGlobe Foundation (США);
- космическая съемка на участок Амга за 2009–2012 гг. предоставлена и подготовлена компанией ГК Сканэкс;
- космическая съемка Corona 1960–1970 гг.;
- цифровая модель местности Tandem-X получена по гранту компании DLR (Германия);
- общедоступная космическая съемка Landsat, Sentinel, общедоступная цифровая модель местности Arctic DEM.

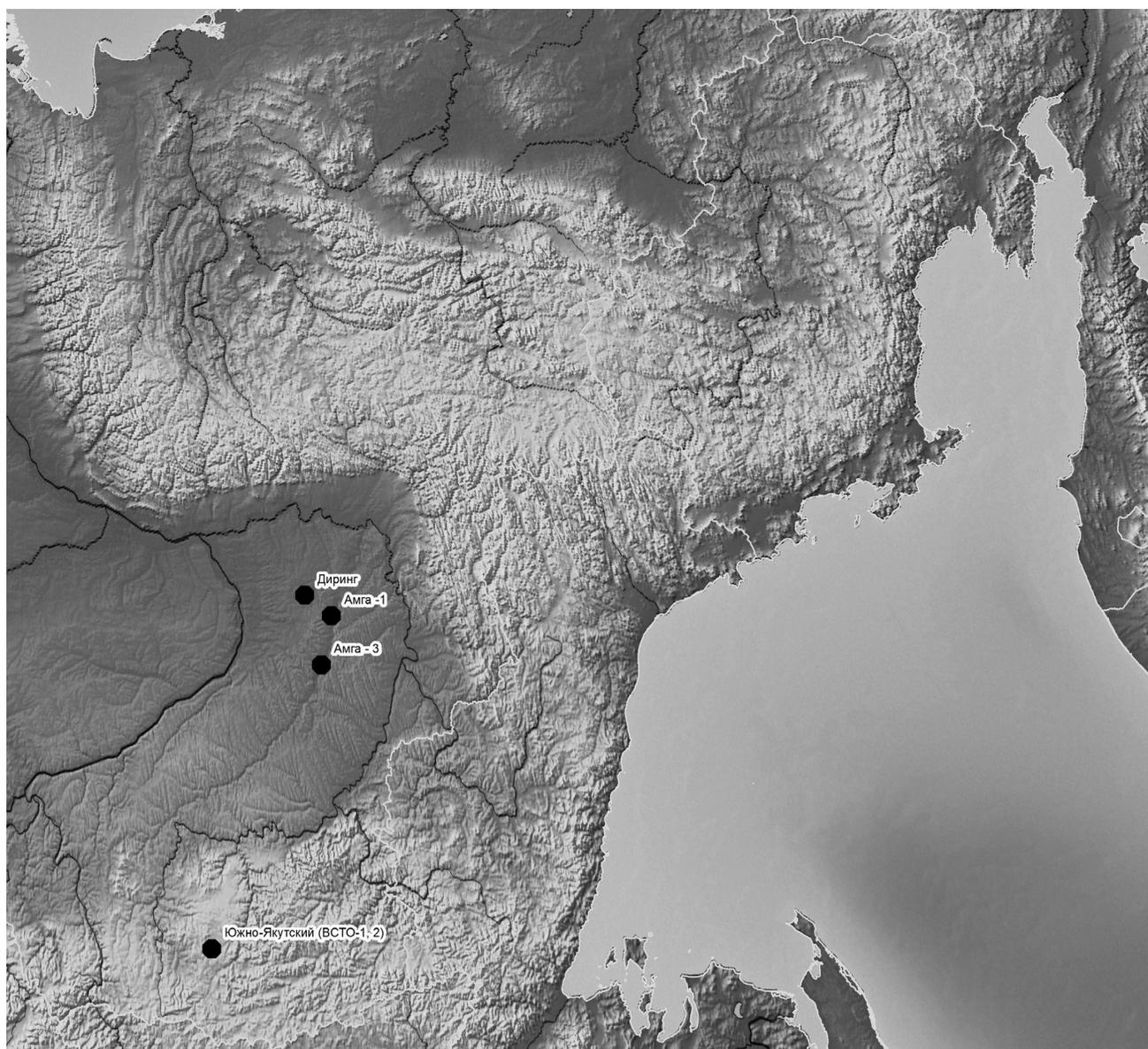


Рис. 2. Участки, на которых проводилась эмпирическая проверка.

Распределение расстояний между центрами термокарстовых понижений вдоль линейного сооружения, как показано нами экспериментально, подчиняется экспоненциальному распределению [17].

Проведенная в рамках исследования эмпирическая проверка включала:

- выделение понижений инициированного термокарста (термокарстовых озер) по материалам космической съемки;
- определение длин проекций понижений на линейное сооружение;
- определение длин проекций понижений на направление, перпендикулярное линейному сооружению, и значений коэффициентов удлинения;
- определение коэффициентов корреляции длин проекции очагов на линейное сооружение

и на направление, перпендикулярное линейному сооружению;

- сопоставление по критерию Пирсона эмпирического распределения коэффициента удлинения с теоретическим логнормальным;
- сопоставление по критерию Пирсона эмпирического распределения проекций с теоретическим логнормальным.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Соответствие распределения длин проекций понижений на линейное сооружение и перпендикуляр к его оси логнормальному закону распределения

Следствием модели является то, что распределения длин проекций понижений на линейное

Таблица 1. Сопоставление эмпирического распределения проекций очага на линейное сооружение и на перпендикуляр к его оси с теоретическим логнормальным

Участок	Проекция	Объем выборки, (шт)	Параметры выборки длин проекций				p^*
			средн., м	мин., м	макс., м	стандарт, м	
ВСТО-1	На трубопровод	74	7.82	2.54	21.30	3.87	0.452
	На перпендикуляр	74	4.01	1.32	7.18	1.42	0.373
ВСТО-2	На трубопровод	54	8.63	2.89	28.34	4.98	0.494
	На перпендикуляр	54	4.62	1.73	9.67	2.04	0.051
Диринг	На дорогу	57	64.44	10.98	246.32	55.96	0.304
	На перпендикуляр	57	21.85	5.58	64.69	13.83	0.377
Амга-1	На дорогу	36	130.85	22.73	394.62	77.63	0.160
	На перпендикуляр	36	39.82	10.81	125.48	26.22	0.414
Амга-3	На дорогу	124	65.44	8.41	281.95	86.49	0.351
	На перпендикуляр	124	31.36	5.88	214.65	114.29	0.001

* p (здесь и в табл. 2) – величина, дополнительная к квантилю, соответствующему фактическому значению критерия; гипотеза согласуется с выборкой на уровне 0.99, если p больше или равно 0.01.

сооружение и перпендикуляр к его оси должны соответствовать логнормальному распределению. В табл. 1 приведены результаты сопоставления по критерию Пирсона эмпирического распределения проекций с теоретическим логнормальным.

На рис. 3 (а, б) приведен типичный вид кумулятивного графика распределения длин проекций (на примере участка Амга-1).

Для остальных участков и выборок виды графиков соответствия сходны с участком Амга-1.

Как следует из анализа табл. 1, для всех выборок подтвердилась исходная гипотеза о соответствии распределений длин проекций на линейное соору-

жение и перпендикуляр к линейному сооружению логнормальному на уровне значимости 0.99. На всех участках есть существенная положительная корреляция длин проекций на линейное сооружение и на направление перпендикулярное к нему. Это говорит о справедливости второго допущения модели об определенной, хоть и стохастической пропорциональности длин полуосей.

Соотношение длин проекции очагов на линейное сооружение и на направление перпендикулярное к нему

Было исследовано изменение коэффициента пропорциональности между проекциями понижений на линейное сооружение и перпендикуляр к нему.

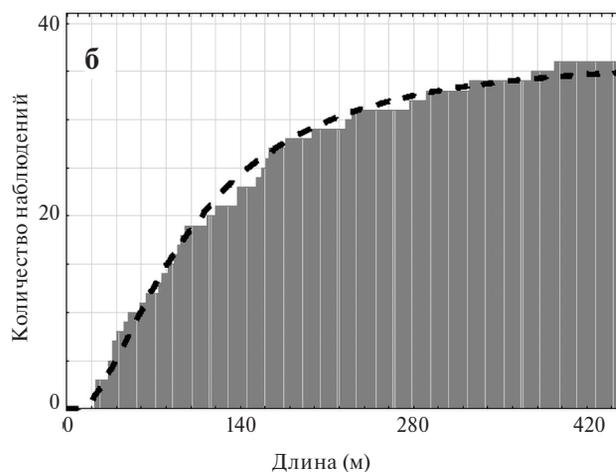
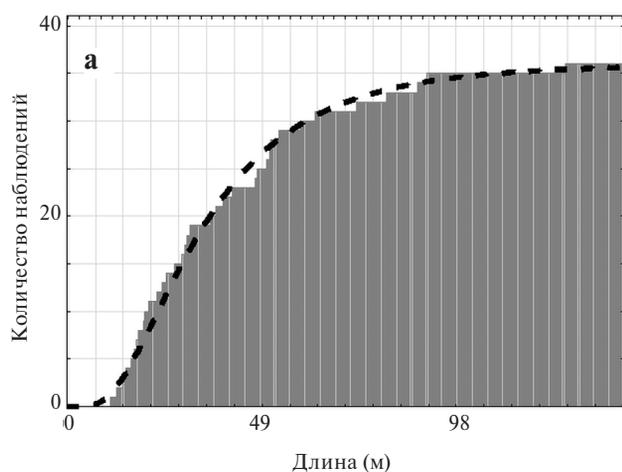


Рис. 3. Сопоставление распределений длин проекций с теоретическим логнормальным распределением для участка Амга-1. Проекция длин: а – на линейное сооружение, б – на перпендикуляр к линейному сооружению.

Таблица 2. Значение коэффициента удлинения и корреляции длин проекций на линейное сооружение и перпендикуляр к его оси и сопоставление распределения коэффициента удлинения с теоретическим логнормальным распределением

Участок	Средний коэффициент удлинения	Коэффициент корреляции	ρ
ВСТО-1	0.556	0.217	0.066
ВСТО-2	0.537	0.543	0.495
Диринг	0,508	0.652	0.033
Амга-1	0.387	0.571	0.063
Амга-3	0.603	0.534	0.796

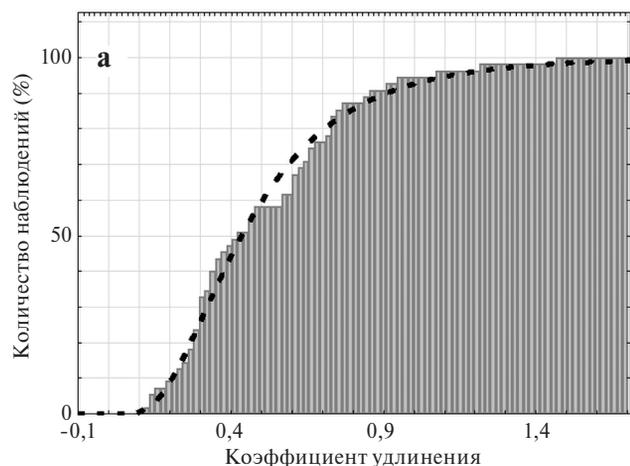
В табл. 2 приведены средние значения отношения между проекцией на линейное сооружение и перпендикуляр к нему (коэффициент удлинения), коэффициент корреляции между проекциями для каждого понижения и результат сопоставления распределения коэффициента удлинения с логнормальным распределением.

На рис. 4 (а, б) приведены примеры графиков сопоставления распределения коэффициентов удлинения с теоретическим логнормальным распределением.

Результаты подтверждают предложенную модель на уровне значимости 0.99.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:



- разработана расширенная модель развития инициированного термокарстового процесса в области развития линейных сооружений и выполнена ее эмпирическая проверка;

- получены закономерности размеров термокарстовых очагов для линейных сооружений для инициированного термокарста — логнормальное распределение длин проекций на линейное сооружение и на направление, перпендикулярное линейному сооружению;

- показана существенная корреляция длин проекций на линейное сооружение и на направление, перпендикулярное линейному сооружению;

- полученная модель дает возможность перейти к решению задачи вероятностной оценки риска поражения линейного сооружения очагами инициированного термокарста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Викторов А.С.* Математическая модель термокарстовых озерных равнин как одна из основ интерпретации материалов космических съемок // Исследование Земли из космоса 1995. №5. С. 42-50.
2. *Викторов А.С.* Математическая морфология ландшафта. М.: ТРАТЕК, 1998. 180 с.
3. *Викторов А.С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
4. *Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н., Архипова М.В., Березин П.В., Зверев А.В., Панченко Е.Н., Садков С.А.* Анализ развития морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин на основе математической модели // Геоморфология. 2015. № 3. С. 3-13.
5. *Викторов А.С., Орлов Т.В., Капралова В.Н., Трапезникова О.Н., Архипова М.В., Березин П.В., Зверев А.В., Садков С.А., Панченко Е.Г.* Математиче-

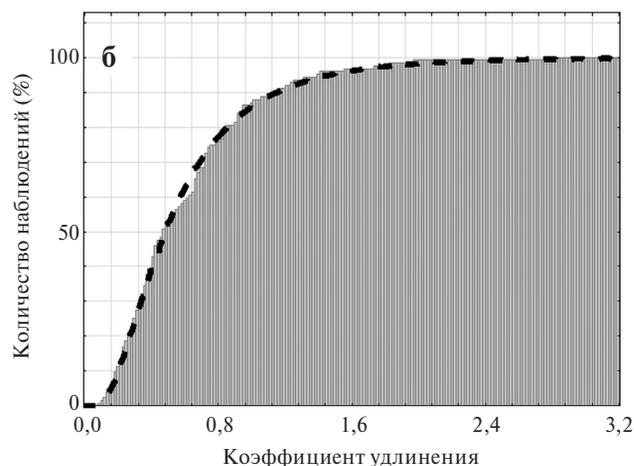


Рис. 4. Сопоставление распределения коэффициентов удлинения с теоретическим логнормальным распределением. Участок: а — Диринг, б — Амга-3.

- ская морфология ландшафтов криолитозоны. М.: Изд-во РУДН, 2016. 230 с.
6. Елкин В.А. Региональная оценка карстовой опасности и риска (на примере Республики Татарстан): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЭ РАН, 2004. 24 с.
 7. Капралова В.Н. Закономерности развития термокарстовых процессов в пределах озерно-термокарстовых равнин (на основе подходов математической морфологии ландшафта): дис. ... канд. геол.-мин. М., 2014. 25 с.
 8. Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1:200000 (1:100000-1:500000). М.: Недра, 1978. 391 с.
 9. Оценка и управление природными рисками: матер. Всерос. конф. «Риск-2003», Т. 1. М.: РУДН, 2003. 412 с.
 10. Перльштейн Г.З., Павлов А.В., Левашов А.В., Сергеев Д.О. Нетемпературные факторы теплообмена деятельного слоя с атмосферой. Матер. третьей конференции геокриологов России, Москва, 1-3 июня 2005 г. Т. 1. М.: МГУ, 2005. С. 86-91.
 11. Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками. Тематический том / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Изд. Фирма «КРУК», 2003. 320 с.
 12. 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.
 13. Шур Ю.Л. Термокарст (к теплофизическим основам учения о закономерностях развития процесса). М.: Недра, 1977. 80 с.
 14. Ling F., and T. Zhang. Numerical simulation of permafrost thermal regime and talik development under shallow thaw lakes on the Alaskan Arctic Coastal Plain // J. Geophys. Res. 2003. 108. 4511. Doi:10.1029/2002JD003014.
 15. Ling F., Wu Q., Zhang T. and Niu F. Modelling Open-Talik Formation and Permafrost Lateral Thaw under a Thermokarst Lake, Beiluhe Basin, Qinghai-Tibet Plateau // Permafrost and Periglac. Process., 2012. V. 23. N 4. P. 312-321. Doi:10.1002/ppp.1754.
 16. Romanovskii, N.N., Hubberten H.-W. Results of permafrost modelling of the lowlands and shelf of the Laptev Sea Region // Permafrost and Periglac. Process., 2001. V.12. N 2. P. 191-202. Doi:10.1002/ppp.387.
 17. Victorov A.S., Orlov T.V., Kapralova V.N., Trapeznikova O.N., Sadkov S.A., Zverev A.V. Stochastic Modeling of Human-Induced Thermokarst and Natural Risk Assessment for Existing and Planned Engineering Structures // Natural Hazards and Risk Research in Russia. Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering. Svalova V. (eds). Springer, Cham. 2019. P. 219-239.

REFERENCES

1. Victorov, A.S. *Matematicheskaya model' termokarstovyykh ozernyykh ravnin kak odna iz osnov interpretatsii materialov kosmicheskikh s'yemok* [Mathematical model of thermokarst lacustrine plains as one of the foundations of remote sensing data interpretation]. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 1995, no. 5, p.42-50. (in Russian)
2. Victorov, A.S. *Matematicheskaya morfologiya landshafta* [Mathematical morphology of landscape], Moscow, Tratek, 1998, 180 p. (in Russian)
3. Victorov, A.S. *Osnovnyye problemy matematicheskoi morfologii landshafta* [The main problems of the mathematical morphology of landscape], Moscow, Nauka, 2006. 252 p. (in Russian)
4. Victorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V., Trapeznikova, O.N., Arkhipova, M.V., Berezin, P.V., Zverev, A.V., Panchenko, E.N., Sadkov, S.A. *Analiz razvitiya morfologicheskoi struktury ozerno-termokarstovyykh ravnin na osnove matematicheskoi modeli* [Analysis of the development of the morphological pattern of thermokarst lacustrine plain on the basis of a mathematical model]. *Geomorfologiya*, no. 3, 2015, p. 3-13. (in Russian)
5. Victorov, A.S., Orlov, T.V., Kapralova, V.N., Trapeznikova, O.N., Arkhipova, M.V., Berezin, P.V., Zverev, A.V., Sadkov, S.A., Panchenko, E.N. *Matematicheskaya morfologiya landshaftov kriolitozony* [Mathematical model of landscapes in cryolithozone], Moscow, RUDN Publ., 2016, 230 p. (in Russian)
6. Yolkin, V.A. *Regional'naya otsenka karstovoi opasnosti i riska (na primere Respubliki Tatarstan)*. [Regional assessment of karst danger and risk (on the example of the Republic of Tatarstan)]. Extended Abstract of Cand. Sci. (Geol.-Min.) Diss. Moscow, IEG RAN, 2004, 24 p. (in Russian)
7. Kapralova, V.N. *Zakonomernosti razvitiya termokarstovyykh protsessov v predelakh ozerno-termokarstovyykh ravnin (na osnove podkhodov matematicheskoi morfologii landshafta)* [Regularities in the development of thermokarst processes within lacustrine thermokarsty plains (based on the approaches of mathematical morphology of landscape)] . Extended Abstract of Cand. Sci. (Geol.-Min.) Diss. Moscow, 2014, 25 p. (in Russian)
8. *Metodicheskoye rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskoy s'yemke masshtaba 1:200000 (1:100000-1:500000)*. [Methodological guidelines for engineering-geological survey to a scale of 1: 200000 (1: 100000-1: 500000)], Moscow, Nedra, 1978, 391 p. (in Russian)
9. *Otsenka i upravlenie prirodnymi riskami* [Assessment and management of natural risks]. Proc. All-Russia

- Conference “Georisk-2003», vol. 1. Moscow, RUDN Publ., 2003, 412 p. (in Russian)
10. Perl'shtein, G.Z., Pavlov, A.V., Levashov, A.V., Sergeev, D.O. *Netemperaturnye faktory teploobmena deyatelnogo sloya s atmosferoi* [Non-temperature factors of heat exchange of the active layer with the atmosphere]. Proc. Third Conference of Russian Geocryologists, Moscow, June 1-3, 2005, MGU Publ., 2005, p. 86-91. (in Russian)
 11. *Prirodnye opasnosti Rossii. Otsenka i upravleniye prirodnymi riskami*. [Natural Hazards of Russia. Assessment and management of natural risks]. Thematic volume, Ragozin, A.L., Ed., Moscow, KRUK Publ., 2003. 320 p. (in Russian)
 12. Ragozin, A.L. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy otsenki i upravleniya prirodnymi riskami v stroitel'stve* [Current state and prospects of assessment and management of natural risks in construction]. *Analiz i otsenka prirodnogo i tekhnogenogo riska v stroitel'stve* [Analysis and assessment of natural and technogenic risk in engineering]. Ministroi Rossii. Moscow, PNI-IIS, 1995, pp. 9-25 (in Russian)
 13. Shur, Yu.L. *Termokarst (k teplofizicheskim osnovam ucheniya o zakonmernostyakh razvitiya protsessa)* [Thermokarst (to the thermophysical foundations of the theory of the laws of the process development)]. Moscow, Nedra, 1977, 80 p. (in Russian)
 14. Ling, F., and T. Zhang Numerical simulation of permafrost thermal regime and talik development under shallow thaw lakes on the Alaskan Arctic Coastal Plain. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108. 4511, doi:10.1029/2002JD003014, D16.
 15. Ling, F., Wu, Q., Zhang, T. and Niu, F., Modelling Open-Talik Formation and Permafrost Lateral Thaw under a Thermokarst Lake, Beiluhe Basin, Qinghai-Tibet Plateau. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2012, no. 23, pp. 312–321. doi:10.1002/ppp.1754
 16. Romanovskii, N. N. and Hubberten, H.-W. Results of permafrost modelling of the lowlands and shelf of the Laptev Sea Region. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, no. 12, pp. 191–202. doi:10.1002/ppp.387
 17. Victorov A.S., Orlov T.V., Kapralova V.N., Trapeznikova O.N., Sadkov S.A., Zverev A.V. Stochastic Modeling of Human-Induced Thermokarst and Natural Risk Assessment for Existing and Planned Engineering Structures // Natural Hazards and Risk Research in Russia. Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering. Svalova V. (eds). Springer, Cham. 2019. P. 219-239.

DEVELOPMENT OF THE INDUCED THERMOKARST MODEL FOR THE REMOTE ASSESSMENT OF NATURAL HAZARD

A. S. Victorov^{1,*}, T. V. Orlov^{1,**}, A. L. Dorozhko¹, A. V. Zverev²

¹*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

^{*}*E-mail: vic_as@mail.ru*

^{**}*E-mail: dist@geoenv.ru*

²*Moscow State University of Geodesy and Cartography, Gorokhovskii per., 4, Moscow, 105064 Russia*

The paper deals with the probabilistic approach to modelling the thermokarst processes induced by linear engineering structures. We have improved the previously published model and have determined the mathematical laws for the two semi-axes of the thermokarst focus (the lengths of the projections on an engineering structure and its perpendicular). The analytically obtained laws should be followed with the validity of the proposed model: the lengths of the projection on the engineering structure and the perpendicular must obey the lognormal distribution; the ratio of the lengths of the projections between them must have a statistically significant correlation and obey the lognormal distribution. The proposed model was tested at five sites in Eastern Siberia. For all sites, the proposed model has confirmed its validity. Thus, the proposed model can be used for remote hazard assessment and risk analysis for linear structures in the permafrost zone.

Keywords: *thermokarst, remote sensing, pipeline, road, probabilistic modelling, natural hazard assessment, risk assessment.*

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019268-76>