

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.4.042

МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ИНИЦИИРОВАННЫХ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ (НА ОСНОВЕ ПОДХОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОРФОЛОГИИ ЛАНДШАФТА)¹

© 2018 г. А. С. Викторов^{1,*}, Т. В. Орлов¹, В. Н. Капралова¹, А. Л. Дорожко¹

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

*E-mail: vic_as@mail.ru

Поступила в редакцию 30.12.2017 г.

В статье рассматриваются термокарстовые процессы в полосе, прилегающей к сооружению, и не рассматриваются процессы, развивающиеся непосредственно под сооружением и возникшие благодаря его термическому воздействию. Разработка теоретических моделей основывается на подходах математической морфологии ландшафта, базирующихся на теории случайных процессов. Созданы модели развития инициированного термокарстового процесса в области развития линейных сооружений (линейный вариант и зонный вариант), и выполнена их эмпирическая проверка. Теоретически обоснованы и эмпирически подтверждены закономерности распределения инициированных термокарстовых очагов для линейных сооружений – экспоненциальное распределение расстояний между проекциями центров термокарстовых понижений на линейное сооружение и логнормальное распределение площадей понижений. Линейный вариант модели можно перенести на очаги термокарста, формирующиеся непосредственно под линейным сооружением. Эмпирическая проверка выполнена на ряде участков Восточной Сибири: Амга-1, Амга-3, Диринг, Центрально-Якутский и Южно-Якутский участки (ВСТО-1, ВСТО-2).

Ключевые слова: математическая морфология ландшафта, термокарстовый процесс, инициированный термокарст, линейное сооружение, моделирование

DOI: 10.1134/S0869780318040129

ВВЕДЕНИЕ

Оценка природных рисков при проектировании линейных сооружений – одна из актуальных задач современности [5, 7, 9, 10]. Существующие подходы к ее решению, базирующиеся на накопленных статистических данных, не вполне исчерпывают существующие 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.

Возникающие проблемы приводят к необходимости поиска новых подходов к оценке вероятности поражения линейных сооружений. Один из возможных подходов – моделирование термокарстовых процессов [8, 11–14]. Отметим, что полноценное моделирование термодинамических процессов отличается значительной сложностью.

Цель настоящей работы – разработка модели развития инициированных термокарстовых процессов в зоне линейных сооружений на основе подходов математической морфологии ландшафта. В данном исследовании рассматриваются термокарстовые процессы в полосе, прилегающей к сооружению, и не рассматриваются процессы, возникшие непосредственно под сооружением из-за его термического воздействия.

Математическая морфология ландшафта – научное направление, в котором исследуются количественные закономерности развития ландшафтных рисунков и методы их математического анализа. Объектом изучения является ландшафтный

¹ Исследования выполнены в рамках фундаментальных научных исследований по госбюджетной теме № г.р. АААА-А18-118022190118-4 и при финансовой поддержке гранта РГО-РФФИ № 17-05-41141.

рисунок территории (морфологическая структура), т.е. пространственная мозаика, которую образуют на земной поверхности участки, соответствующие развитым на этой территории природно-территориальным комплексам. Поскольку весьма часто очаги природных процессов отвечают природно-территориальным комплексам, то результаты математической морфологии ландшафта могут быть использованы при анализе экзогенных геологических процессов, в том числе термокарстового процесса.

Один из главнейших результатов развития математической морфологии ландшафта – созданные математические модели ландшафтных рисунков [2, 3], особенно так называемые канонические математические модели ландшафтных рисунков. Каноническими математическими моделями морфологических структур определенного генетического типа называются модели структур, сформировавшихся под действием одного процесса в однородных физико-географических условиях, т.е. простых ландшафтных рисунков.

МОДЕЛЬ ИНИЦИИРОВАННОГО ТЕРМОКАРСТОВОГО ПРОЦЕССА

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. Пусть 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 подразумевается сочетание следующих условий:

- однотипность рельефа поверхности, проявляющаяся в однородном рисунке изображения материалов космических съемок;
- постоянный вещественный состав отложений, слагающих поверхность, и подстилающих отложений;
- сохраняющаяся на протяжении всего участка мощность поверхностных отложений, отсутствие погребенных ложбин;
- нахождение в пределах одной тектонической структуры и отсутствие тектонических нарушений;
- относительно однородные геокриологические условия.

Естественно в модели не предполагается абсолютная однородность физико-географических условий, а лишь статистическая однородность, допускающая случайные колебания.

Таким образом, модель не охватывает значительный ряд случаев развития термокарстового процесса, например, случай расположения термокарстовых озер по полигональной сети, продиктованной повторно-жильными льдами.

При создании модели мы придерживаемся следующих представлений о развитии термокарстового озера, основанных на результатах ряда геокриологических исследований [8, 11]. 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, например: скопление в первичном понижении слоя воды с мощностью, превышающей некоторое критическое значение [8], 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 исследуемой ситуации морфологические особенности термокарстового озера (в однородных условиях это круговые или округлые очертания) [6].

Первая стадия относительно короткая. Модель относится преимущественно ко второй стадии, которая по длительности является основной. В основу модели положены подходы теории случайных процессов.

Комплекс моделей инициированного термокарстового процесса в этом случае включает:

- модель инициированного термокарстового процесса 1.0 (линейный вариант)
- модель инициированного термокарстового процесса 1.1 (зонный вариант).

Модель инициированного термокарстового процесса 1.0 (линейный вариант) базируется на следующих допущениях:

1. Возникновение термокарстовых понижений происходит непосредственно в полосе прилегания к линейному сооружению и независимо друг от друга, и вероятность их возникновения на данном отрезке определяется только величиной отрезка $(\Delta L)^2$

$$p(\Delta L) = \gamma \Delta L + o(\Delta L),$$

где γ – параметр.

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

2. Рост термокарстовых понижений (водоемов) благодаря термоабразионному воздействию³ происходит независимо друг от друга, и он прямо пропорционален плотности тепловых потерь через боковую поверхность понижения, залитой водой.

Таким образом, рассматривается вариант синхронного старта, когда процесс появления первичных понижений происходит за короткий промежуток времени после начала строительства линейного сооружения. Понижение в этой схематизации рассматривается как объект овальной формы, вытянутой вдоль линейного сооружения (рис. 1). Нарушения в полосе, прилегающей к сооружению, рассматриваются как примерно однородные.

Первое предположение представляется естественным, так как вытекает из однородности рассматриваемой территории и отражает то, что на любой ограниченной площадке наблюдается лишь конечное число термокарстовых понижений (точнее – их центров).

Второе предположение также представляется справедливым. Оно сводится 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 озера и др.). Это положение проверялось для природного (не инициированного) термокарста и нашло подтверждение [4].

Такие предположения являются упрощенными, не отражающими все разнообразие природных взаимосвязей; однако их “гибкий” характер, базирующийся на вероятностных представлениях, придает им определенный “запас прочности”.

Используя преобразования, аналогичные примененным в разработанной ранее модели природного термокарста [3], 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.

Второе предположение в результате преобразований (аналогичных используемым в модели природного термокарста [1, 3]) приводит к тому,

³ Возможна и низкая интенсивность термоабразии, при этом процесс приближается к “чисто термокарстовому”.

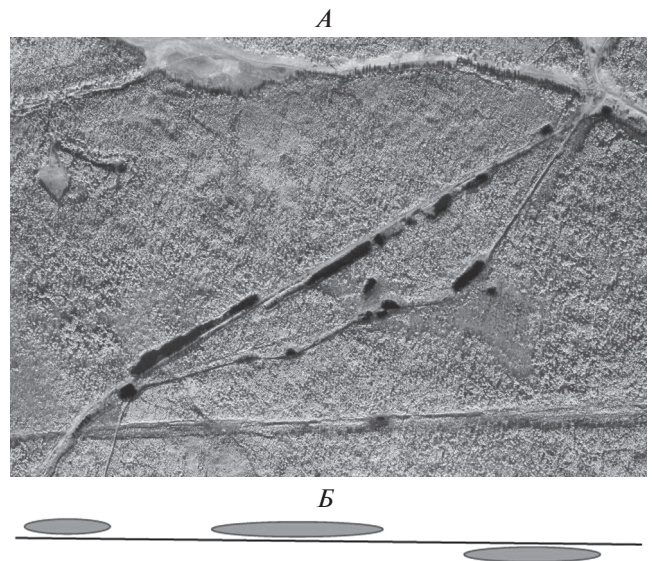


Рис. 1. Космический снимок (А) и схема (Б) инициированного термокарстового процесса в зоне линейных сооружений (линейный вариант); пояснения в тексте.

что распределение площади понижений должно отвечать логнормальному распределению

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

где a, σ – параметры распределения, x – площадь понижения через время t .

Анализ первого выражения позволяет получить распределение расстояний ξ между центрами термокарстовых понижений вдоль линейного сооружения

$$F_\xi(x) = 1 - P\{\xi > x\} = 1 - P_0(0, x),$$

и, учитывая (1), получаем

$$F_\xi(x) = 1 - e^{-\gamma x}.$$

Таким образом, при условии справедливости модели распределение расстояний между центрами термокарстовых понижений вдоль линейного сооружения должно отвечать экспоненциальному распределению.

Модель инициированного термокарстового процесса 1.1 (зонный вариант) базируется на следующих допущениях:

1. Возникновение термокарстовых понижений происходит в ограниченной полосе (шириной l), прилегающей к линейному сооружению, независимо друг от друга, а вероятность их возникновения на данной площадке определяется только ве-

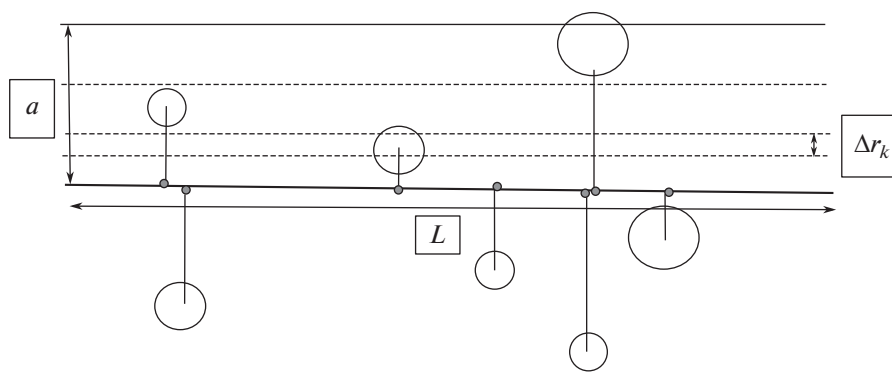


Рис. 2. Схема инициированного термокарстового процесса в зоне линейных сооружений (зонный вариант); круги – термокарстовые очаги, точки – проекции центров очагов на линию линейного сооружения; пояснения в тексте.

личиной площадки $(\Delta s)^4$ и удаленностью от линейного сооружения

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

где $\lambda(r)$ – коэффициент.

2. Рост термокарстовых понижений (водоемов) благодаря термоабразионному воздействию⁵ происходит независимо друг от друга, 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. Понижение в этой схематизации рассматривается как объект круговой или овальной формы, вытянутой вдоль линейного сооружения.

Первое предположение представляется естественным. Оно 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 учитываются пространственные особенности нарушений в зоне линейного сооружения, приводящие к развитию термокарста. Характер нарушений (нарушения почвенно-растительного покрова, микрорельефа, геокриологических условий) меняется в зависимости от расстояния до линейного сооружения и, в общем, сохраняется

ся при движении параллельно сооружению. Иначе говоря, основное направление изменчивости условий возникновения термокарста перпендикулярно сооружению. Это учитывается в виде функции $\lambda(r)$, зависящей от расстояния до сооружения.

Второе предположение также представляется справедливым. Оно сводится, как и в первой 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 озера и др.).

Допущения модели позволяют получить распределение числа центров термокарстовых понижений, проецирующихся на заданную длину линейного сооружения (L) (рис. 2).

Для этого разобьем полосу, в которой генерируются термокарстовые понижения, на несколько полос шириной Δr_k . Каждую такую полосу можно рассматривать как приблизительно отвечающую условию однородности, и соответственно распределение числа возникших на ней центров термокарстовых понижений будет подчиняться закону Пуассона [3] со средним значением, равным произведению плотности расположения центров, отвечающей удаленности полосы от сооружения, на площадь полосы

$$\gamma_k \approx \lambda(r_k)\Delta r_k L.$$

Среднее число центров термокарстовых понижений, проецирующихся на заданную длину линейного сооружения (L), будет приблизительно равно соответственно сумме этих средних по всем полосам разбиения. Равенство перейдет в точное

⁴ При этом для малых площадок вероятность возникновения одного понижения много больше, чем вероятность возникновения нескольких понижений.

⁵ Возможна и низкая интенсивность термоабразии, при этом процесс приближается к “чисто термокарстовому”.

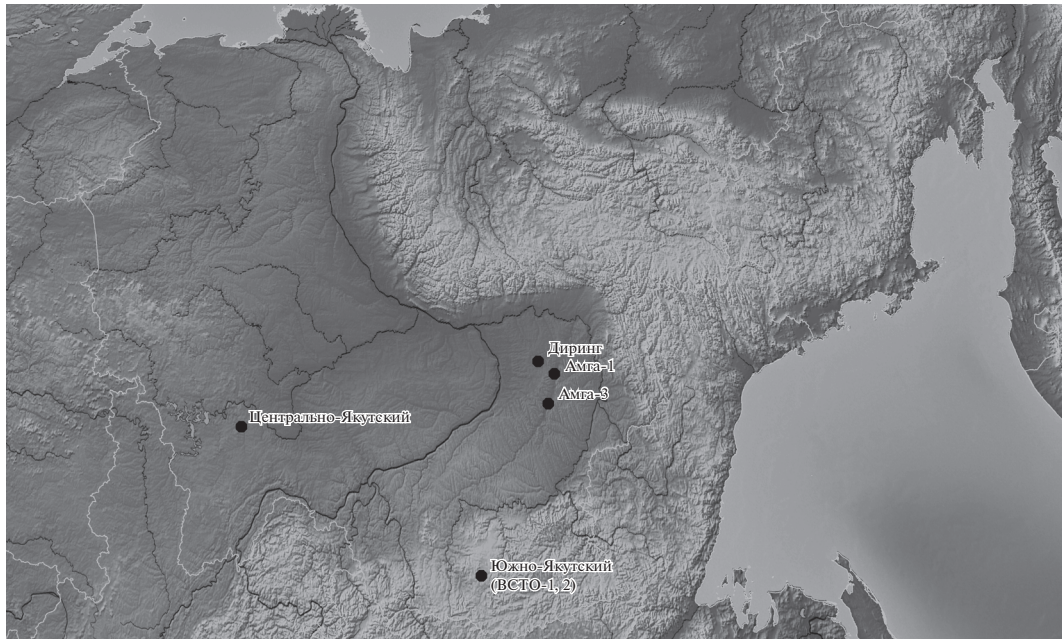


Рис. 3. Схема расположения эталонных участков: Диринг; Амга-1; Амга-3; ВСТО-1; ВСТО-2.

при ширине полосы, стремящейся к нулю, и бесконечном увеличении числа полос; соответственно в этом случае для среднего справедливо равенство

$$\gamma = L \int_0^a \lambda(r) dr,$$

соответственно, среднее число центров термокарстовых понижений на единицу длины будет составлять

$$\mu = \int_0^a \lambda(r) dr.$$

Закон распределения центров термокарстовых понижений, проецирующихся на заданную длину линейного сооружения (L), останется пуассоновским как сумма некоторого числа независимых случайных величин, распределенных по закону Пуассона

$$P(k, L) = \frac{[\mu L]^k}{k!} e^{-\mu L}.$$

Используя ход построений аналогичный линейному случаю, нетрудно получить, что распределение расстояний между центрами термокарстовых понижений вдоль линейного сооружения должно при условии справедливости модели отвечать также экспоненциальному распределению.

Второе предположение в результате преобразований, аналогичных используемым в модели природного термокарста, приводит к тому, что

распределение площади понижений также должно отвечать логнормальному распределению.

ЭМПИРИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА

Для ряда выводов полученных моделей была выполнена эмпирическая проверка. Первый этап – выбор эталонных участков, на части из которых велась проверка.

На каждый участок были заказаны материалы космической съемки, в том числе повторные. Пространственные данные были получены из нескольких источников:

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

Эмпирические проверки велись по участкам Амга-1, Амга-3, Диринг, Центрально-Якутский и

Таблица 1. Соответствие эмпирических и теоретических логнормальных распределений площадей озер (иницированный термокарст)

Участок	Подучасток	Объем выборки	Длина участка (км)	Средняя площадь (м ²)	Стандартное отклонение	<i>p</i>
Амга	Амга-1	35	8.19	5277	6198.751	0.518
	Амга-3	113	7.01	1269	2921.541	0.668
	Диринг	78	35.73	1109	1444.670	0.459
ВСТО	ВСТО-1	74	3.96	77	56.143	0.064
	ВСТО-2	54	2.25	101	89.651	0.078

p – квантиль, отвечающий вычисленному значению критерия хи-квадрат; гипотеза не отвергается на уровне значимости 0.95, если *p* > 0.05.

Южно-Якутский участки (ВСТО-1, ВСТО-2) (рис. 3).

Эмпирическая проверка включала:

- выделение термокарстовых озер по материалам космической съемки,
- определение центров озер и их проекций на линейное сооружение,
- определение расстояния между соседними проекциями озер,
- определение площадей озер,
- сопоставление по критерию Пирсона эмпирического распределения расстояний с теорети-

ческим экспоненциальным и распределения площадей – с логнормальным.

Результаты подтверждают предложенную модель на уровне значимости 0.99 (табл. 1, 2 и рис. 4, 5).

Из экспоненциальности распределения расстояний между проекциями центров термокарстовых понижений нетрудно получить, что распределение числа проекций центров понижений на случайный отрезок линейного сооружения соответствует закону Пуассона.

Наконец линейный вариант модели легко перенести на очаги термокарста, формирующиеся непосредственно под линейным сооружением.

Таблица 2. Соответствие эмпирических и теоретических экспоненциальных распределений расстояний между проекциями центров соседних озер (иницированный термокарст)

Участок	Подучасток	Объем выборки	Длина участка (км)	<i>p</i>
Амга	Амга-1	34	8.19	0.156
	Амга-3	112	7.01	0.087
	Диринг	77	35.73	0.095
ВСТО	ВСТО-1	73	3.96	0.658
	ВСТО-2	53	2.25	0.826

Отдельный блок исследований выполнен для случая антропогенно-иницированного термокарста Центрально-Якутского участка (Мирный), здесь были использованы снимки World-View–2 с разрешением 0.5 м/пикс. Формирование первичных термокарстовых понижений, заполненных водой, происходит на площадке, расчищенной от почвенного-растительного покрова при подготовке и на начальных этапах строительства. Снимки были сделаны через год после снятия почвенно-растительного покрова. На снимках зафиксирована стадия формирования начальных термокарстовых понижений. Общая площадь рассматриваемого участка составила 0.1 км². Проверка модели включала определение распределения числа центров первичных термокарстовых понижений на случайно выбранной площадке (пространственное положение центров) и сопоставление его по критерию Пирсона с распределением Пуассона. Результаты по-

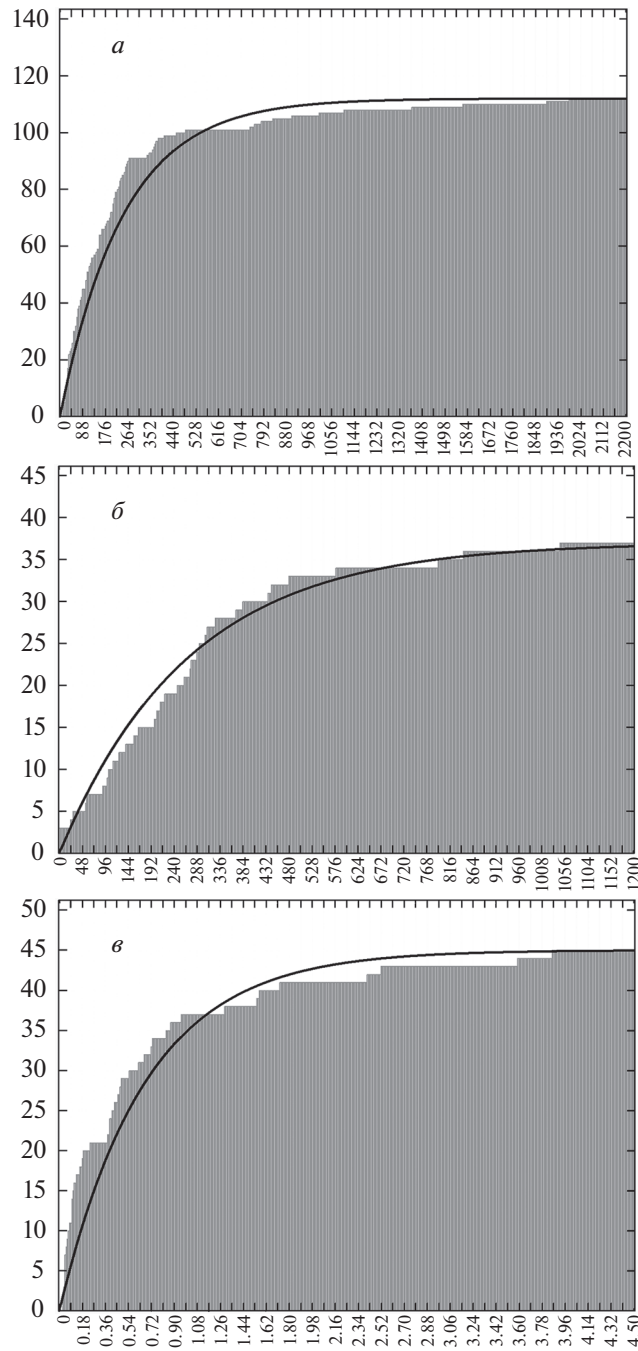


Рис. 4. Сопоставление эмпирического распределения расстояние между соседними проекциями термокарстовых озер на ось линейного сооружения с теоретическим экспоненциальным: *a* – Амга-1, *б* – Амга-3, *в* – Диринг.

казали соответствие гипотезе на уровне значимости 0.99.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Созданы модели развития инициированного термокарстового процесса вблизи линейных сооружений (линейный вариант и зонный вариант), и выполнена их эмпирическая проверка.
2. Получены закономерности распределения очагов инициированного термокарста в области влияния линейного сооружения – логнормаль-

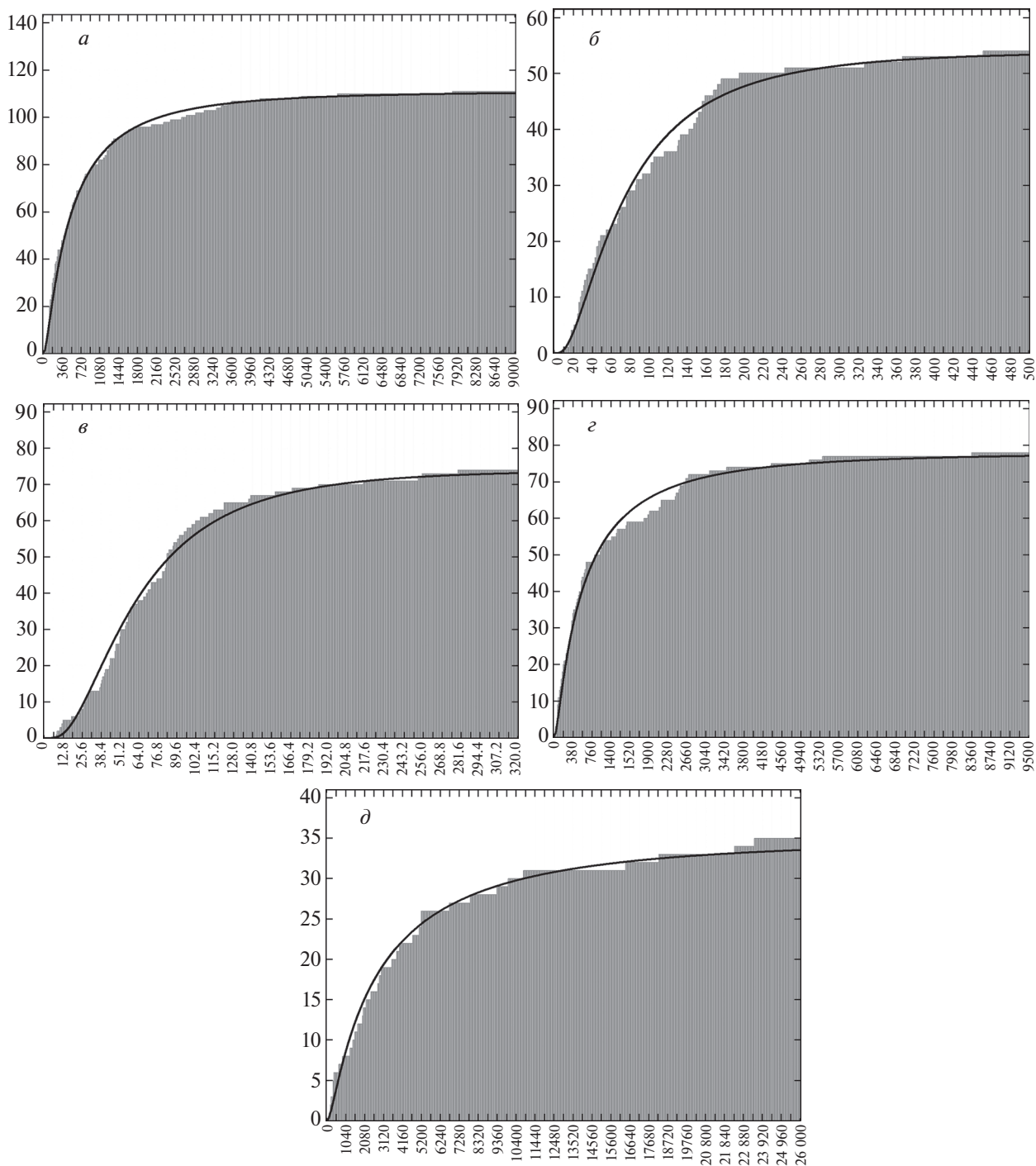


Рис. 5. Сопоставление эмпирического распределения площади термокарстовых озер (инициированный термокарст) с теоретическим логнормальным: *a* – Амга-3, *б* – ВСТО-2, *в* – ВСТО-1, *г* – Диринг, *д* – Амга-1.

ное распределение площадей понижений, и экспоненциальное распределение расстояний между проекциями центров понижений на линейное сооружение.

3. Разработанные модели могут служить основанием для решения задачи оценки вероятности поражения линейного сооружения для 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. 191 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. 30–13.
5. *Елкин В.А.* Региональная оценка карстовой опасности и риска (на примере Республики Татарстан). Автореф. дисс. на соиск. ст. канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЭ РАН, 2004. 24 с.
6. Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1 : 200000 (1 : 100000–1 : 500000) / ВНИИ гидрогеологии и инж. геологии; [Е.С. Мальников, Н.Г. Верейский, Л.А. Островский и др.]. М.: Недра, 1978. 391 с.
7. Оценка и управление природными рисками. Матер. Всерос. конф. “Риск-2003”. Т. 1. М.: РУДН, 2003. 412 с.
8. *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.
9. Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками. Тематический том / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Изд. Фирма “КРУК”, 2003. 320 с.
10. *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.
11. *Шур Ю.Л.* Термокарст (к теплофизическим основам учения о закономерностях развития процесса). М.: Недра, 1977. 80 с.
12. *Ling F., and Zhang T.* 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
13. *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. № 4. P. 312–321. doi 10.1002/ppp.1754
14. *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. № 2. P. 191–202. doi 10.1002/ppp.387

THE MODEL OF TRIGGERED THERMOKARST PROCESS WITHIN THE LINEAR STRUCTURE ZONE (BASED ON THE MATHEMATICAL MORPHOLOGY OF LANDSCAPE APPROACH)

A. S. Victorov^{a,#}, T. V. Orlov^a, V. N. Kapralova^a, and A. L. Dorozhko^a

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

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

The research deals with thermokarst developing within the band adjacent to a linear engineering structure and it does not take into account the processes developing under a engineering structure due to its thermal impact. The theoretical modeling uses the approach of the mathematical morphology of landscape based on the random process theory. The performed research has resulted in the model of triggered thermokarst development within the zone adjacent to a linear structure (a linear version and a zone version); empirical testing of the models was also done. Thus the distribution laws of triggered thermokarst depressions for a linear structure are substantiated theoretically and verified empirically including the exponential distribution of lengths between projections of the centers of thermokarst depressions to the linear structure and lognormal distribution of depression areas. The linear version of the model is easy to transfer to the thermokarst foci, formed directly under the linear structure. Empirical testing is done for a number of key sites of East Siberia such as Amga 1, Amga 3, Diring, Central Yakutian and Southern Yakutian sites (VSTO 1, VSTO 2).

Key words: *mathematical morphology of landscape, thermokarst process, initiated thermokarst, linear engineering structure, modeling*

REFERENCES

1. Viktorov, A.S. *Matematicheskaya model' termokarstovykh ozernykh 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. Viktorov, A.S. *Matematicheskaya morfologiya landshafta* [Mathematical morphology of landscape], Moscow, 1998, 180 p. (in Russian)
3. Viktorov, A.S. *Osnovnyye problemy matematicheskoi morfologii landshafta* [The main problems of the mathematical morphology of landscape], Moscow, Nauka, 2006. 252 p. (in Russian)
4. Viktorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V., Trapeznikova, O.N., Arkhipova, M.V., Berezin, P.V., Zverev, A.V., Panchenko, Ye.N., Sadkov, S.A. *Analiz razvitiya morfologicheskoi struktury ozerno-termokarstovykh 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. 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)
6. *Metodicheskoye rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskoi 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)
7. *Otsenka i upravlenie prirodnyimi riskami* [Assessment and management of natural risks]. Proc. All-Russia Conference “Georisk-2003”, vol. 1. Moscow, RUDN Publ., 2003, 412 p. (in Russian)
8. Perl'shtein, G.Z., Pavlov, A.V., Levashov, A.V., Sergeev, D.O. *Netemperaturnye faktory teploobmena deyatel'nogo 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)
9. *Prirodnye opasnosti Rossii. Otsenka i upravleniye prirodnyimi 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)
10. Ragozin, A.L. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy otsenki i upravleniya prirodnyimi riskami v stroitel'stve* [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 technogenic risk in engineering]. Minstroy Rossii. Moscow, PNIIS, 1995, pp. 9–25. (in Russian)
11. Shur, Yu.L. *Termokarst (k teplofizicheskim osnovam ucheniya o zakonomernostyakh razvitiya protsessa)* [Thermokarst (to the thermophysical foundations of the theory of the laws of the process development)]. Moscow, Nedra, 1977, 80 p. (in Russian)
12. Ling, F., and Zhang T. 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.
13. 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
14. 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