

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПРИРОДНЫХ РИСКОВ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРНО-ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН)

© 2013 г. А. С. Викторов*, В. Н. Капралова

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва

**E-mail: dist@geoenv.ru*

Поступила в редакцию 01.02.2013 г.

Рассматривается новый подход к оценке риска воздействия термокарстовых процессов на инженерные сооружения, базирующийся на использовании материалов космической съемки и методах математической морфологии ландшафта. Получены выражения для оценки риска поражения линейных и площадных сооружений для процессов с пуассоновским распределением термокарстовых очагов произвольной формы. Опытные участки с развитием термокарстовых озер были оцифрованы, и на них были сопоставлены теоретические результаты и эмпирические данные на предмет их соответствия.

Ключевые слова: оценка риска, математическая морфология ландшафта, термокарстовые процессы

DOI: 10.7868/S0205961413040106

Одной из актуальных задач является оценка риска в условиях развития опасных экзогенных геологических процессов.

Задаче оценки риска посвящены многие исследования (Оценка и управление ..., 2003; Елкин 2004 и др.), однако до сих пор ее решение остается актуальным. Трудность состоит в том, что мало исследованы те особенности процессов, которые позволяют рассчитать вероятности и величины поражения. При статистическом подходе трудность состоит в необходимости получить большие объемы данных по статистике поражения сооружения, причем в каждом типе физико-географических условий, которые пересекает инженерное сооружение. Время, необходимое для получения таких данных, сопоставимо с временем функционирования инженерного сооружения, а оценка риска нужна уже на стадии проектирования сооружения. В силу изложенного такой подход не очень перспективен.

Цель выполненных исследований — показать возможность и пути решения задачи оценки риска на основе материалов аэро- или космических съемок.

Исследование проведено на примере озерно-термокарстовых равнин (рис. 1). Исследуемый тип территории представляет собой слабоволнистую субгоризонтальную поверхность с преобладанием тундровой растительности, в которую вкраплены термокарстовые озера, беспорядочно разбросанные по равнине. Исходно для возника-

ющих очагов термокарстовых процессов (озер) характерна форма, близкая к кругу, однако в процессе развития для подобных территорий свойственно слияние очагов, и в силу этого форма очагов в общем случае может значительно отличаться от круговой (рис. 1). Именно этот последний фактор создает значительные сложности в решении задачи оценки рисков.

При выполнении исследования были использованы материалы космической съемки спутника Landsat-7\ETM+.

Предлагаемый путь решения задачи оценки природных рисков был основан на количественном анализе морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин по материалам космических съемок с использованием методов математической морфологии ландшафта (Викторов, 1995, 2006). В основу решения задачи была положена базовая каноническая модель морфологической структуры озерно-термокарстовой равнины (Викторов, 1995, 2006; Victorov, 2005). Рассмотрим участок озерно-термокарстовой равнины, однородный по физико-географическим, прежде всего по геоморфологическим условиям. В процессе развития очаг термокарстовых процессов может находиться в следующих стадиях:

— появление первичного очага — главным фактором является, по-видимому, накопление в понижении достаточно мощного слоя воды (Perlstein et al., 2005);

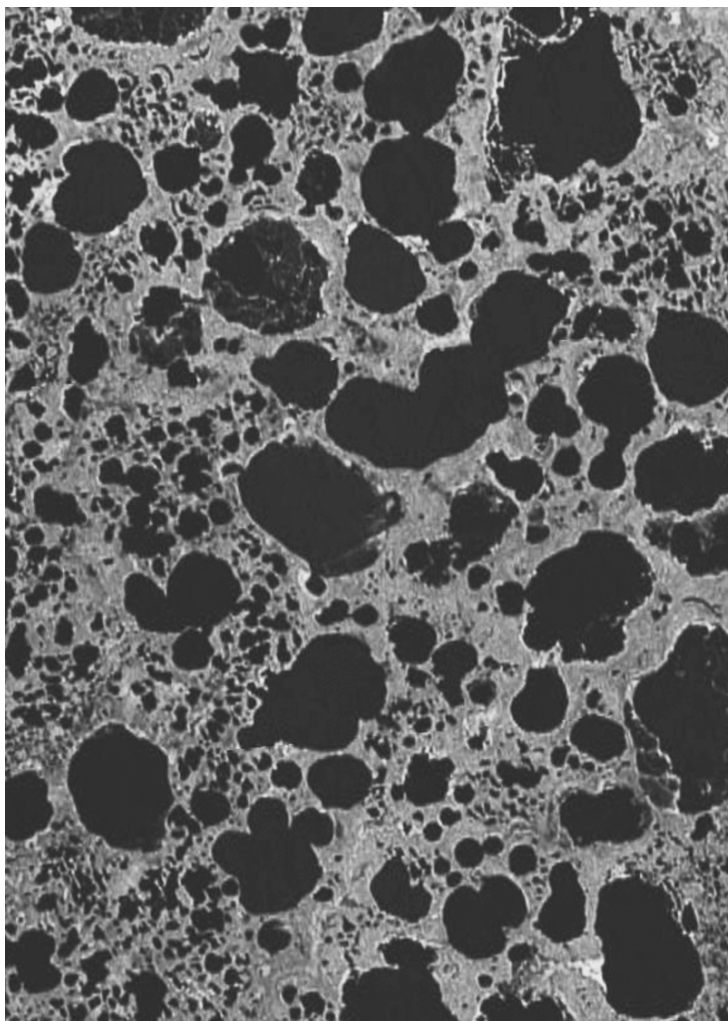


Рис. 1. Типичное изображение озерно-термокарстовой равнины на материалах космической съемки.

— расширение очага (термокарстового озера) за счет термоабразионного воздействия. Его скорость зависит от многих случайных факторов (средняя температура воздуха, льдистость многолетнемерзлых пород и состав грунта в окрестностях озера и т.д.). В процессе расширения возможно слияние с другими озерами, примыкающими к нему.

В основу модели могут быть положены следующие предположения:

1) процесс появления первичных понижений является вероятностным, и на непересекающихся площадках (Δs), а также в неперекрывающемся отрезки времени (Δt), идет независимо, при этом и вероятность появления одного понижения много больше, чем вероятность возникновения нескольких понижений, т.е.

$$p_1(t) = \lambda(t)\Delta s\Delta t + o(\Delta s\Delta), \quad (1)$$

$$p_k(t) = o(\Delta s\Delta t) \quad k = 2, 3, \dots, \quad (2)$$

где $\lambda(t)$ — плотность генерации понижений на единице площади в момент времени t ;

2) рост размеров озер благодаря термоабразионному воздействию является случайным процессом и происходит независимо от других озер, в процессе развития озера могут сливаться.

Предположения представляются естественными, так как вытекают из однородности рассматриваемой территории и существующих представлений о механизме процесса. Подчеркнем, что интенсивность генерации термокарстовых очагов во времени может изменяться самым разным образом, и мы не делаем в отношении этого никаких специальных предположений.

Созданные основания модели позволяют на основе строгого математического анализа предположений получить закономерности строения термокарстовой равнины (Викторов, 1995; Victorov, 2005). В частности, распределение числа термо-

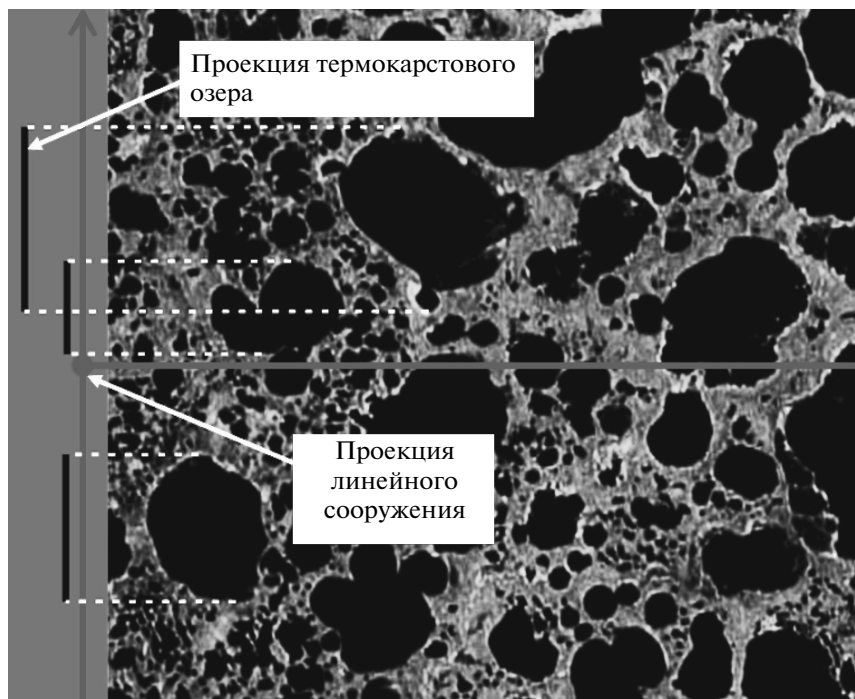


Рис. 2. Схема к определению вероятности поражения термокарстом линейного сооружения.

карстовых понижений (центров) на случайно выбранной площадке отвечает закону Пуассона, т.е.

$$P(k, t) = \frac{[\mu(t)s]^k}{k!} e^{-\mu(t)s}, \quad (3)$$

где s — площадь пробной площадки; $\mu(t)$ — среднее число понижений на единицу площади в момент времени t . Плотность расположения понижений в общем случае зависит от времени, так как возможна генерация новых термокарстовых озер, и даже при отсутствии генерации новых озер — из-за их слияния.

Пуассоновский характер распределения озер подтверждается как нашими экспериментальными данными, так и публикациями других авторов (Викторов, 1995, 2006; Викторов, Капралова, 2011; Полищук и др., 2012).

Оценим вероятность поражения линейного сооружения заданной длины L . Для этого рассмотрим сначала полосу конечной ширины R (рис. 2), по оси которой расположен рассматриваемый линейный объект. Построим координатную ось, перпендикулярную линейному сооружению.

В проекции на эту ось сооружение изображается точкой, очаг термокарста — отрезком, длина которого отвечает проекции очага на ось. Поражение линейного сооружения отражается как пересечение отрезка и точки. Нетрудно показать, что пуассоновский характер распределения очагов на участке влечет пуассоновское распределение их проекций на ось и, следовательно, равную

вероятность расположения центров проекций очагов на тех или иных участках оси и их независимость друг от друга. Вероятность (α) того, что один очаг процесса из числа названных заденет линейное сооружение (т.е. что точка, отвечающая проекции линейного сооружения, окажется внутри проекции очага), обуславливается в силу сказанного выше отношением длины проекции очага к ширине рассматриваемой полосы. Это с учетом вероятности различных величин проекций позволяет получить выражение

$$\alpha = \int_0^{2R} \frac{x}{2R} f_p(x, t) dx, \quad (4)$$

где $f_p(x, t)$ — плотность распределения величины проекции очага в момент времени t . Вероятность того, что ни один из очагов процесса не заденет линейное сооружение при условии, что их на полосе — k штук, с учетом независимости очагов равна

$$P^0(k, R, t) = (1 - \alpha)^k \frac{[2\mu(t)RL]^k}{k!} e^{-2\mu(t)RL}. \quad (5)$$

Защищенность (вероятность непоражения) линейного сооружения при произвольном количестве очагов на полосе может быть получена суммированием по k и переходом к пределу при неограниченном расширении рассматриваемой полосы ($R \rightarrow +\infty$)

$$P_{nl}^0(R, t) = \sum_{k=0}^{+\infty} (1 - \alpha)^k \frac{[2\mu(t)RL]^k}{k!} e^{-2\mu(t)RL} = e^{-2\mu(t)\alpha RL}. \quad (6)$$

Поскольку

$$\lim_{R \rightarrow +\infty} 2\alpha R = \int_0^{+\infty} x f_p(x, t) dx = \overline{pr(t)}, \quad (7)$$

где $\overline{pr(t)}$ — математическое ожидание величины проекции очага в момент времени t , то после упрощения защищенность дается выражением

$$P_{nl}(L, t) = e^{-\mu(t)\overline{pr(t)}L}. \quad (8)$$

Отсюда нетрудно получить, что вероятность поражения линейного объекта длиной L хотя бы одним очагом равна

$$P_{dl}(L, t) = 1 - e^{-\mu(t)\overline{pr(t)}L}. \quad (9)$$

Оценим вероятность поражения инженерного сооружения круговой формы заданного радиуса l очагом термокарстового процесса. Поражение сооружения очагом процесса в момент времени t реализуется при реализации одного из двух событий:

- центр сооружения оказался в контуре очага;
- центр сооружения оказался вне контура, но на расстоянии меньше l от очага.

Последнее означает, что центр сооружения оказался в l -буфере очага. l -Буфером фигуры мы будем называть совокупность точек плоскости, не входящих в очаг, но отстоящих от него на расстояние не больше l . Таким образом, вероятность поражения площадного объекта равно произведению вероятностей двух названных выше событий.

Нетрудно получить, что вероятность центра сооружения оказаться в пределах какого-либо очага, с учетом независимости площади очага от его расположения и взаимного непересечения очагов, на данный момент составляет

$$P_l(t) = \mu(t)s(t), \quad (10)$$

где $\mu(t)$ — среднее число очагов на единицу площади в момент времени t ; $s(t)$ — средняя площадь одного очага в момент времени t .

Для определения вероятности второго события рассмотрим сначала круговую область конечного радиуса R , в которой расположены центр сооружения и термокарстовые очаги. Вероятность того, что центр сооружения окажется в l -буфере очага (то есть очаг “заденет” второе озеро), определяется отношением площади l -буфера очага ко всей рассматриваемой площади круговой области и с учетом вероятностей формирования буферов очагов разной площади составляет

$$\alpha(l, t) = \int_0^{\pi R^2} \frac{x}{\pi R^2} f_b(x, l, t) dx, \quad (11)$$

где $f_b(x, l, t)$ — плотность распределения площади l -буфера очага в момент времени t . Далее, оценивая вероятность того, что ни один из очагов процесса не заденет рассматриваемый объект при условии, что их на полосе — k штук, переходя к произвольному количеству очагов и бесконечно расширяя рассматриваемую круговую область, получаем выражение

$$P_2(l, t) = e^{-\mu(t)s_b(l, t)}, \quad (12)$$

где $s_b(l, t)$ — средняя площадь l -буфера очага в момент времени t , задаваемая равенством

$$s_b(l, t) = \int_0^{+\infty} x f_b(x, l, t) dx. \quad (13)$$

Таким образом, общая вероятность поражения кругового сооружения радиуса l в рассматриваемой модели составляет

$$P(l, t) = 1 - [1 - \mu(t)s(t)]e^{-\mu(t)s_b(l, t)}. \quad (14)$$

Формула может быть существенно упрощена в случае, если очаги имеют выпуклую форму или выпукло-вогнутую форму, но с кривизной не менее $-\frac{1}{l}$; иначе говоря, если вогнутые участки очага имеют меньшую кривизну, чем граница сооружения. В этом случае, заменяя кривую ломаной и бесконечно увеличивая количество звеньев, получаем следующее выражение

$$s_b(l, t) = \overline{lp(t)} + \pi l^2, \quad (15)$$

где $\overline{p(t)}$ — средний периметр очага в момент времени t .

Соответственно вероятность поражения кругового сооружения радиуса l в этом случае составляет

$$P(l, t) = 1 - [1 - \mu(t)s(t)]e^{-\mu(t)[\overline{lp(t)} + \pi l^2]}. \quad (16)$$

Обобщение понятия буфера позволяет нам найти выражение и для площадного сооружения не круговой, а сложной формы. В подобном случае буфер — это область, окружающая контур очага, такая, что при нахождении в ней центра сооружения данных очертаний S и данной ориентировки очаг задевает контур сооружения. В этих условиях буфер — функция четырех факторов: контура очага, контура сооружения и угла между линией, соединяющей центры очага и сооружения, и диаметром очага и угла между линией, соединяющей центры очага и сооружения, и диаметром сооружения.

В целом, как показывает анализ, выражение для вероятности поражения площадного сооружения сохраняется

$$P(l, t) = 1 - [1 - \mu(t)s(t)]e^{-\mu(t)s_b(C, t)}, \quad (17)$$

где $s_b(C, t)$ – средняя площадь буфера очага в момент времени t по отношению к инженерному сооружению, имеющему заданные очертания C .

Таким образом, вероятность поражения площадного сооружения за заданное время зависит от средней плотности расположения очагов, средней площади очага и средней площади буфера, отвечающего сооружению данных очертаний. Этот набор параметров отличается от набора параметров, от которых зависит вероятность поражения линейного сооружения.

Решая последнюю задачу, мы фактически решили и задачу о вероятности слияния термокарстовых озер за отрезок времени $[0, t]$. Для этого достаточно заменить инженерное сооружение на второй очаг и считать, что его очертания имеют, как и у первого очага, некоторое вероятностное распределение. Нетрудно получить, что угол взаимной ориентировки очагов (угол между диаметрами) в связи с однородностью условий участка будет иметь равномерное распределение на отрезке $[0, 2\pi]$. В итоге вероятность слияния очагов на интервале $[0, t]$ составляет

$$P_i(t) = 1 - [1 - \mu(t)s(t)]e^{-\mu(t)s_{bi}(t)}, \quad (18)$$

где $s_{bi}(t)$ – средняя площадь буфера термокарстового очага по отношению к другому очагу в момент времени t , задаваемая выражением

$$s_{bi}(t) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{2\pi} x f_{bi}(x, \alpha, t) dx d\alpha, \quad (19)$$

а $f_{bi}(x, \alpha, t)$ – плотность распределения площади буфера термокарстового очага по отношению к другому очагу, при угле взаимной ориентировки α в момент времени t .

Исходя из полученной формулы, нетрудно, дифференцируя, получить вероятность слияния озера с каким-либо другим на заданном отрезке времени $[t, t + \Delta t]$

$$P_c(t, t + \Delta t) = \left[\frac{1}{1 - \mu(t)s(t)} \frac{d}{dt} \mu(t)s(t) + \frac{d}{dt} \mu(t)s_{bi}(t) \right] \Delta t + \alpha(\Delta t). \quad (20)$$

Полученные выражения для линейных сооружений прошли первичную проверку на эталонных участках (Западная Сибирь). В основу проверки выражения для оценки вероятности поражения линейного объекта была положена следующая логика. Предположим, что мы находимся на рассматриваемом участке перед началом термокарстового процесса. Так как участок однороден, у нас нет оснований предпочесть для размещения линейного объекта какое-либо место, и он с равной вероятностью мог быть размещен в любой точке участка. Развившиеся впоследствии очаги процесса, которые в настоящее

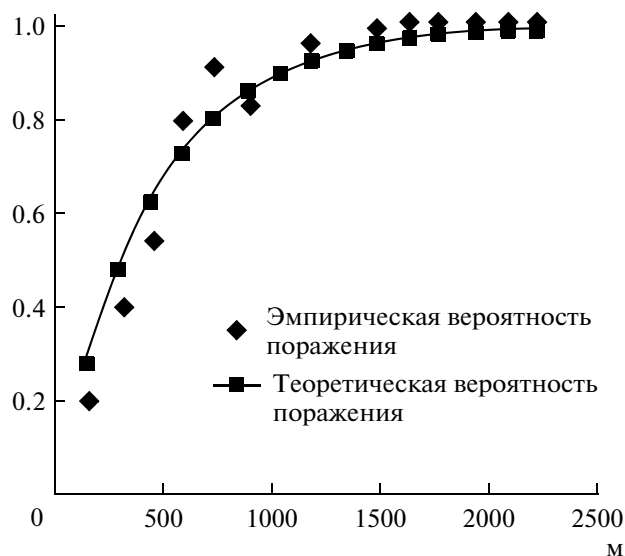


Рис. 3. Сопоставление теоретической и эмпирической вероятностей поражения линейного сооружения разной протяженности на экспериментальном участке (Среднеобская низменность; ось абсцисс – длина сооружения).

время мы наблюдаем на снимке, могли бы поразить или не поразить линейное сооружение.

В силу сказанного реальное развитие событий было смоделировано следующим образом: программными средствами с помощью генератора случайных чисел мы размещаем случайным образом линейный объект (отрезок) в пределах выбранного участка (с уже существующими очагами), а затем по материалам космической съемки подсчитываем количество линий, пересекшихся с очагами процесса. Полученные значения числа линейных объектов, пораженных очагом процесса (в долях от общего количества бросаний), сравнивались с расчетными, определенными по приведенной формуле (9).

Процедура повторялась для линейных сооружений (отрезков) разной длины. Проверка дала положительные результаты (рис. 3).

Нетрудно видеть, что мы не использовали существенно механизм термокарстового процесса, а только то, что распределение очагов имеет пуассоновский характер, и они изменяются независимо друг от друга. Поэтому полученный результат может быть распространен на случай других процессов, где очаги возникают и развиваются независимо (например, заболачивание, просадочный процесс и др.).

Изложенная модель является основой для использования материалов дистанционных съемок при оценке риска. В свете изложенного процедура, например, по отношению к линейным сооружениям должна содержать следующие основные элементы:

– прогнозирование на основе повторных съемок на время функционирования сооружения математического ожидания проекции возникающих очагов на ось, перпендикулярную направлению линейного сооружения (линейная экстраполяция или линейная экстраполяция математического ожидания логарифма проекции);

– прогнозирование на основе повторных съемок на время функционирования сооружения математического ожидания плотности расположения возникающих термокарстовых очагов (линейная экстраполяция);

– определение вероятности поражения на основе полученных выражений.

Кроме того, необходим учет роста уже существующих очагов на основе логнормального распределения (Викторов, 2006); параметры определяются на основе повторных съемок.

ВЫВОДЫ

1. Получены выражения, которые могут быть использованы для оценки риска поражения линейных и площадных сооружений для процессов с пуассоновским распределением очагов произвольной формы (термокарст, просадки, карст, подтопление и др.).

2. Получена модель морфологической структуры развития озерно-термокарстовых равнин, учитывающая слияние термокарстовых озер.

3. Показано, что районирование по величине риска поражения сооружения для линейных и площадных сооружений в общем случае не совпа-

дает, так как вероятности поражения зависят от разных параметров очагов опасных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Викторов А.С. Математическая модель термокарстовых озерных равнин как одна из основ интерпретации материалов космических съемок // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 5. С. 42–50.

Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.

Викторов А.С., Капралова В.Н. Применение методов математической морфологии ландшафта для оценки риска поражения линейных инженерных сооружений опасными экзогенными процессами // Геоэкология. 2011. № 2. С. 165–174.

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.

Оценка и управление природными рисками // Матер. Всерос. конф. “Риск-2003”. Т. 1. М.: РУДН, 2003. 412 с.

Полищук В.Ю. Математическое моделирование динамики термокарстовых процессов на территории многолетней мерзлоты Западной Сибири: Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. Барнаул, 2012. 21 с.

Victorov A.S. Mathematical models of thermokarst and fluvial erosion plains. GIS and spatial analysis // Proc. IAMG. Toronto, Canada, 2005. V. 1. P. 62–67.

Victorov A.S. Risk assessment based on the mathematical model of diffuse exogenous geological processes // Math. Geology. 2007. V. 39. № 8. P. 735–748.

Perlstein G.Z., Levashov A.V., Sergeev D.O. Analysis of thermokarst's early stage with deterministic methods // Trans. 2nd European Permafrost Conf. Potsdam, 2005.

Quantitative Assessment of Natural Risks Based on Remote Sensing Data (Case Study of Thermokarst Plains)

A. S. Victorov, V. N. Kapralova

The paper deals with a new approach for risk assessment of impact of thermokarst processes on engineering constructions, based on remote sensing data and methods of the mathematical morphology of landscape. The equations of risk assessment for linear and areal constructions under processes with Poisson distribution of free-form thermokarst sites. Testing plots with thermokarst lakes were digitized, where theoretical assumptions and empirical data were examined to prove their convergence.

Keywords: risk assessment, mathematical morphology of a landscape, thermokarst processes