

УДК 551.435.5:551.4.013(221.17)

© 2015 г. А.С. ВИКТОРОВ, В.Н. КАПРАЛОВА, Т.В. ОРЛОВ, О.Н. ТРАПЕЗНИКОВА,
М.В. АРХИПОВА, П.В. БЕРЕЗИН, А.В. ЗВЕРЕВ, Е.Н. ПАНЧЕНКО, С.А. САДКОВ

**АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
ОЗЕРНО-ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ¹**

ФГБУН Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва; dist@geoenv.ru

Развитию озерно-термокарстовых равнин посвящено много исследований, в ряде которых на основании материалов повторных дистанционных съемок отслеживается динамика озерно-термокарстовых равнин. Часть авторов считает, что происходит значительное сокращение заозеренности и связывают его с климатическими изменениями [1]. По мнению других изменение заозеренности в разных районах имеет различный тренд или вообще не идет однонаправленно [2, 3]. В некоторых исследованиях предпринята попытка количественного описания морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин на эмпирической основе. Так, в более ранних публикациях авторов настоящей работы был предложен вариант модели развития морфологической структуры однородного участка озерно-термокарстовых равнин при постоянстве климатических условий и круговой формы озера [4, 5]. В.Ю. и Ю.М. Полищуки пришли к выводу об экспоненциальном распределении площадей озер и равномерном в плане распределении их центров [6].

Рассматриваемые проблемы тесно связаны с изучением закономерностей развития отдельных термокарстовых озер. Например, немало работ посвящено моделированию изменений термокарстового озера на основе термодинамических моделей [7–11]. Интересная информация получена при стационарных наблюдениях динамики термокарстовых озер. Так, на основании наблюдений в одном из регионов Северной Америки был сделан вывод о равномерном росте диаметра озера [12]. В горных регионах обнаружено явление резкой пульсации размеров водной поверхности озера, асинхронной по отношению к другим озерам рассматриваемого участка, что предположительно было объяснено открытием и замыканием внутригрунтовых каналов [13]. Широко обсуждался вопрос о режиме генерации (появления) термокарстовых озер. Значительная часть исследователей считает, что термокарстовые озера возникают за сравнительно короткое (по отношению к времени дальнейшего развития) время [11]. Но существует и иная точка зрения, основанная на представлении о растянутом во времени процессе появления озер [14, 15].

Цель настоящей работы – рассмотрение различных вариантов развития озерно-термокарстовых равнин, созданных на основе математического моделирования их морфологической структуры. В основу нашей модели положены подходы математи-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 14-17-00357).

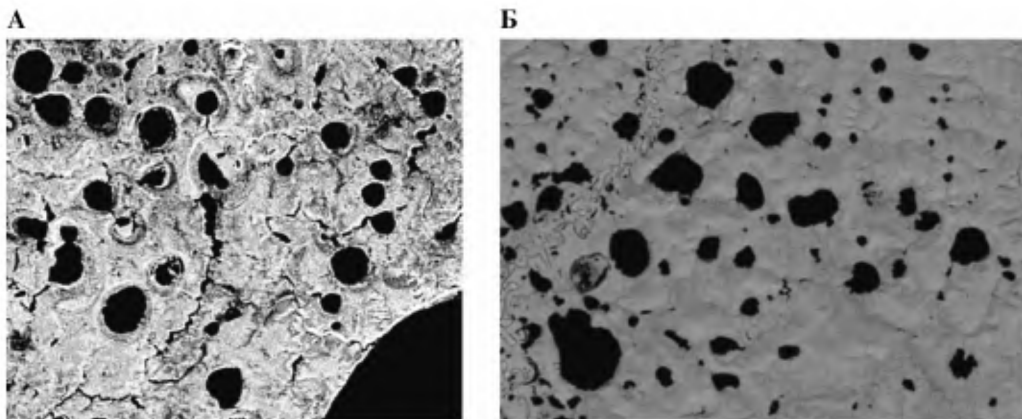


Рис. 1. Типичное изображение озерно-термокарстовой равнины на космоснимке для п-овов Ямал (А) и Гыданский (Б)

ческой морфологии ландшафта, широко использующие теорию случайных процессов [16–18].

В модели рассматривается участок с однородными физико-географическими и геокриологическими условиями. Под однородностью мы подразумеваем сочетание однотипности рельефа поверхности, проявляющейся в однородном рисунке изображения материалов космических съемок, постоянство вещественного состава отложений, слагающих поверхность, и подстилающих отложений, сохраняющаяся на протяжении всего участка одинаковая мощность поверхностных отложений, отсутствие погребенных ложбин и тектонических нарушений, положение в пределах одной тектонической структуры, относительно однородные геокриологические условия. Естественно в модели не предполагается абсолютная однородность, а лишь статистическая однородность, допускающая случайные колебания.

Такими условиями обладает слабоволнистая субгоризонтальная поверхность с преобладанием различной тундровой или лесной растительности (пушицевые тундры, осоково-пушицевые и др.), в которую вкраплены озера, со слабо развитой эрозонной сетью. Озера изометричной, часто округлой формы беспорядочно разбросаны по равнине (рис. 1). Подобные территории часто встречаются в Западной и Восточной Сибири, а также на севере Восточно-Европейской равнины.

Наша модель не является общей и не охватывает многие сценарии развития термокарстовых озер, например, расположение озер по полигональной сети повторно-жильных льдов. В подобных случаях морфологическая структура территории носит иной характер, в частности, озера не беспорядочно расположены, а тяготеют к сетям линий (ортогональных или иных).

При создании модели мы придерживаемся следующих представлений о развитии термокарстового озера, основанных на результатах геокриологических исследований [19 и др.]. На начальном этапе условно выделены две неравноценные стадии. На первой озеро представляет собой понижение, возникшее под действием случайных факторов, инициирующих термокарстовый процесс, – скопление в первичном понижении воды с мощностью, превышающей некоторое критическое значение [19], происходит локальное нарушение теплового баланса за счет скопления снега и т.д. Форма озера на этой стадии может быть весьма разнообразной.

На второй стадии озеро приобретает морфологические особенности термокарстового озера – в рассматриваемых нами однородных условиях это круговые или округлые очертания [20]. Наконец, далее могут наступать стадии слияний озер и затухания процессов.

Первая стадия довольно короткая. Модель относится преимущественно ко второй стадии, основной по длительности, на которой проявляются характерные черты морфологии. В основу модели положены подходы теории случайных процессов. Рассмотрим появление и развитие термокарстовых форм на однородном участке территории. В основу базовой модели (вариант 1.0) положены следующие предположения:

1. Термокарстовые понижения появляются за короткий отрезок времени (“синхронный старт”); процесс вероятностный и на непересекающихся площадках происходит независимо, при этом вероятность возникновения понижений на пробной площадке зависит только от ее площади; для малых площадок вероятность возникновения одного понижения много больше, чем вероятность возникновения нескольких понижений.

2. Рост размеров различных озер под влиянием термоабразии² происходит независимо друг от друга, и он прямо пропорционален запасам тепла в озере и обратно пропорционален площади боковой поверхности озерной котловины, залитой водой.

Таким образом, нами рассматривается вариант синхронного старта, когда процесс появления первичных озер относительно короток по сравнению с периодом их развития, и в дальнейшем число понижений остается постоянным. Озеро в этой схематизации рассматривается как объект круговой формы, как это характерно для многих озер.

Первое предположение естественно, т.к. основывается на 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 (озера) средней плотности тепловых потерь через боковую поверхность озера, залитую водой; при этом на рост влияет и множество случайных факторов (средняя годовая температура воздуха, льдистость пород в окрестностях озера и др.).

Такие предположения упрощают и не отражают все разнообразие природных взаимосвязей; однако гибкий характер предположений, базирующихся на вероятностных представлениях, придает им определенный “запас прочности”.

Созданные основания модели позволяют аналитическим путем установить закономерности морфологии термокарстовой равнины. Как можно показать (например, [21]), из справедливости первого предположения строго вытекает, что распределение P числа термокарстовых понижений (центров) на случайно выбранной площадке подчиняется закону Пуассона [16, 17], т.е.:

$$P(k, s) = \frac{(\gamma s)^k}{k!} e^{-\gamma s},$$

где γ – среднее число понижений на единицу площади, s – площадь пробной площадки.

Рассмотрим изменение размеров термокарстовых понижений. Если V – объем воды в озерной котловине, являющийся комплексным результатом концентрации воды с водосбора, испарения и стока и других процессов формирования водного баланса, то площадь боковой поверхности, залитой водой, составит:

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

где u_j – радиус озера к началу j -го года. Соответственно, из второго предположения модели вытекает выражение

$$\Delta u_j = \frac{cV}{S} \xi_j^0,$$

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

где Δu_j – приращение размеров за j -й год, c – удельная теплоемкость, ξ_j^0 – случайная величина, учитывающая воздействие эпизодических факторов. Данное выражение после подстановки площади из выражения (1) и упрощения приобретает вид

$$\Delta u_j = \xi_j u_j, \text{ где } \xi_j = \frac{c}{2} \xi_j^0. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности ξ_j представляет собой случайную величину, учитывающую 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 и др. Эти коэффициенты для разных лет независимы, но одинаково распределены; обозначим их математическое ожидание и дисперсию следующим образом:

$$M\xi_j = a, \quad D\xi_j = \sigma^2.$$

Переносим переменные, содержащие размер понижений, в левую часть выражения (2), суммируя и заменяя левую сумму интегралом, получаем

$$\ln x(w) - \ln x(q) = \sum_{i=q}^w \xi_i,$$

где $x(w)$ и $x(q)$ – размер понижения соответственно в моменты времени w и q .

Поскольку сумма большого числа независимых (а в нашем случае и одинаково распределенных) слагаемых по центральной теореме [22] распределена нормально, то отсюда следует, что процесс роста радиусов термокарстовых форм можно при значительном $(w - q)$ приближенно рассматривать как марковский случайный процесс с непрерывным временем с переходной функцией

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

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

Если для упрощения в модели мы примем, что первичные термокарстовые понижения в момент возникновения имеют единичный радиус (это отвечает нормированию радиуса по минимальному значению), то отсюда следует, что в любой момент времени мы должны наблюдать логнормальное распределение радиуса термокарстовых форм, т.е.

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

где a, σ – параметры распределения, t – время, прошедшее с начала процесса. С учетом квадратичной связи между площадью и радиусом площадь также должна подчиняться логнормальному закону распределения.

Для приведенных построений не является существенной именно круговая в плане форма озер, если предположить, что в процессе роста сохраняется геометрическое подобие очертаний. В этом случае озеро выступает как цилиндр, но не с круговой направляющей, а с направляющей произвольной формы. Представляется также важным вопрос, насколько влияет на предложенную модель активность термоабразионных (или “чисто термокарстовых”) процессов. Так, озера способны неожиданно сокращать водное зеркало. Это происходит независимо даже у рядом расположенных озер, и одна из причин – исчезновение и последующее восстановление ледяных пробок в грунтовых каналах [13]. В этих случаях водное зеркало перестает достигать борта тер-

мокарстового понижения, и не идет термоабразия борта. Очевидно, в такие моменты скорость роста резко уменьшается, и озеро практически перестает расти. В других случаях причинами резкого замедления роста выступают колебания водного баланса озера.

Анализ показывает, что перерыв в росте озера не оказывает влияния на логнормальный характер распределения. Он может рассматриваться как особенность распределения коэффициентов пропорциональности ξ_i в выражении (2), состоящую в том, что они могут с некоторой ненулевой вероятностью принимать значение ноль. Поскольку мы не накладывали ограничений на распределение этих коэффициентов, а их независимость сохраняется, то это означает, что остается справедливым весь ход анализа.

В качестве второго варианта (вариант 2.0) модели рассмотрим случай, базирующийся на наблюдениях ряда исследователей о равномерном росте озер. Поскольку в эту равномерность всегда могут быть вкраплены случайные колебания скорости роста, то вероятностный аналог этой ситуации будет отличаться вторым предположением, имеющим несколько отличную формулировку:

1а. Рост размеров озер благодаря термоабразионному воздействию происходит независимо друг от друга и имеет постоянное вероятностное распределение. В этом случае выражение (2) заменяется на иное

$$\Delta u_j = \xi_j^0, \quad (3)$$

где Δu_j – приращение размеров за j -й год, ξ_j^0 – случайная величина, учитывающая воздействие эпизодических факторов (количество осадков года, режим выпадения и др.), но в целом остается справедливым весь ход выкладок. Соответствующий анализ, в точности аналогичный предыдущему, приводит к следующему результату: процесс роста радиусов термокарстовых форм можно при значительном $(r - s)$ приближенно рассматривать как Марковский случайный процесс с непрерывным временем с переходной функцией

$$f(v, x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma \sqrt{t}} e^{-\frac{[(x-v)-at]^2}{2\sigma^2 t}},$$

где a , σ – параметры распределения на рассматриваемом временном интервале, v – начальный размер термокарстового понижения, x – размер понижения через время t . Следуя далее и учитывая, что сумма нормально распределенных независимых приращений радиусов также распределена нормально, мы получаем, что в любой момент времени должны наблюдать нормальное распределение радиуса термокарстовых форм, т.е.

$$F_r^0(x, t) = \Phi\left(\frac{x - at}{\sigma \sqrt{t}}\right),$$

соответственно по закону Гаусса будет распределен и диаметр.

Рассмотрим несколько отличающуюся ситуацию – асинхронного старта. Пусть генерация новых термокарстовых озер продолжается в течение всего рассматриваемого периода времени $(0, t)$, интенсивность генерации является переменной и задается функцией $\lambda(u)$, определяющей среднее количество озер, появляющихся на единице площади в момент времени u . В этом случае модель несколько модифицируется и ее первое предположение заменяется:

1.1. Процесс появления термокарстовых понижений происходит постоянно (“асинхронный старт”); он является вероятностным и на непересекающихся площадках и интервалах времени идет независимо, при этом вероятность возникновения понижений на пробной площадке зависит только от ее площади (Δs); для малых площадок и

малых интервалов времени (Δt) вероятность возникновения одного понижения много больше, чем вероятность возникновения нескольких понижений, т.е.

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

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

где $\lambda(u)$ – функция, определяющая среднее количество озер, появляющихся на единице площади в момент времени u . При таком предположении распределение площадей (радиусов) термокарстовых озер к моменту времени t после начала процесса на рассматриваемом участке может быть получено интегрированием с учетом вероятности того, что данное термокарстовое озеро появилось в тот или иной момент времени

$$f(x, t) = \frac{\int_0^t f_0(x, t-u)\lambda(u)du}{\int_0^t \lambda(u)du}, \quad (4)$$

где $f_0(x, u)$ – распределение площади (радиуса) озера через время u после его генерации.

В зависимости от функции плотности распределения генерации озер можно получить очевидно разные результаты определения распределения площадей (радиусов) термокарстовых озер. Рассмотрим случай постоянной равномерной генерации озер, т.е.

$$\lambda(u) = \lambda_0.$$

В этом случае базовая модель 1.0 трансформируется в модель 1.1 с асинхронным стартом (предположение 1а). Плотность распределения радиусов, как показывает использование выражения (3), после упрощения дается выражением

$$f_r(x, t) = \frac{1}{t} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma x \sqrt{u}} e^{-\frac{(\ln x - au)^2}{2\sigma^2 u}} du.$$

Для больших t ($t \rightarrow +\infty$) последний интеграл может быть вычислен, так как сводится к преобразованию Лапласа от функции $\frac{1}{\sqrt{u}} e^{-\frac{\ln x}{2\sigma^2 u}}$ при значении аргумента, равном $\frac{a^2}{2\sigma^2}$. Используя упомянутое преобразование получаем

$$f_r(x, t) \approx \frac{1}{atx} \quad \text{при } x \geq 1.$$

Таким образом, для нормированных радиусов (а также площадей) в модели 1.1 хорошим приближением самого распределения, видимо, может быть

$$F_r(x) \approx \frac{\ln x - \ln a}{\ln b - \ln a}, \quad a \leq x \leq b,$$

где a, b – параметры распределения, которое для краткости в рамках данной работы называется “логарифмическим”³.

³ Название сугубо условное, т.к. вообще логарифмическим распределением называется распределение, отличное от данного.

Виды распределения параметров термокарстовых озер при разных вариантах развития озерно-термокарстовых равнин

Условия развития озерно-термокарстовых равнин	Старт	
	синхронный	асинхронный
Логнормальный рост радиусов озер	Модель 1.0 Логнормальное распределение площадей (радиусов) озер	Модель 1.1 “Логарифмическое” распределение площадей (радиусов) озер
Нормальный рост радиусов озер	Модель 2.0 Нормальное распределение радиусов озер	Модель 2.1 Равномерное распределение радиусов озер

Аналогично может быть рассмотрен случай асинхронного старта в модели 2.0, при этом она трансформируется в модель, которая может быть названа 2.1. Распределение радиусов термокарстовых озер в этой модели может быть найдено указанным выше путем, вычисляя выражение

$$f_r(x, t) = \frac{1}{t} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma \sqrt{u}} e^{-\frac{(x-au)^2}{2\sigma^2 u}} du.$$

Используя описанное приближение легко получаем, что распределение радиусов (а также диаметров) термокарстовых озер при большом времени в модели 1.1 должно отвечать равномерному распределению

$$F_r(x) \approx \frac{x-a}{b-a}, \quad a \leq x \leq b.$$

Таким образом, полученные результаты показывают, что все четыре качественно отличные гипотезы развития морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин (табл. 1) приводят к четырем весьма различающимся выводам о виде распределения радиусов (площадей, диаметров). Для проверки данного теоретического обоснования было проведено эмпирическое исследование реальных распределений параметров термокарстовых озер в пределах озерно-термокарстовых равнин.

Для исследования были выбраны 16 участков в различных регионах (рис. 2). В качестве исходных были использованы материалы космической съемки с разрешением на местности 5–30 м. Методика обработки включала:

- выбор эталонных участков;
- выделение термокарстовых озер;
- определение площадей озер и проверка соответствия распределения площадей озер а) логнормальному и б) “логарифмическому” распределениям;
- вычисление средних диаметров озер и проверка соответствия распределения средних диаметров а) нормальному и б) равномерному распределениям.

Выбор участков осуществлялся визуально по материалам космической съемки, литературным и картографическим данным. Главным требованием являлась генетическая, ландшафтная и морфологическая однородность, достигавшаяся путем анализа снимков и дополнительных источников информации. Таким образом, из участков исключались территории с иным происхождением озер, как правило выражавшимся в их морфологии – аллювиальные равнины, районы, где морфология озер подчинялась решетке полигонально-жильных льдов и др.

Модель, как видно из предположений, не включает случай существенного развития процессов формирования хасыреев (заторфованных котловин спущенных

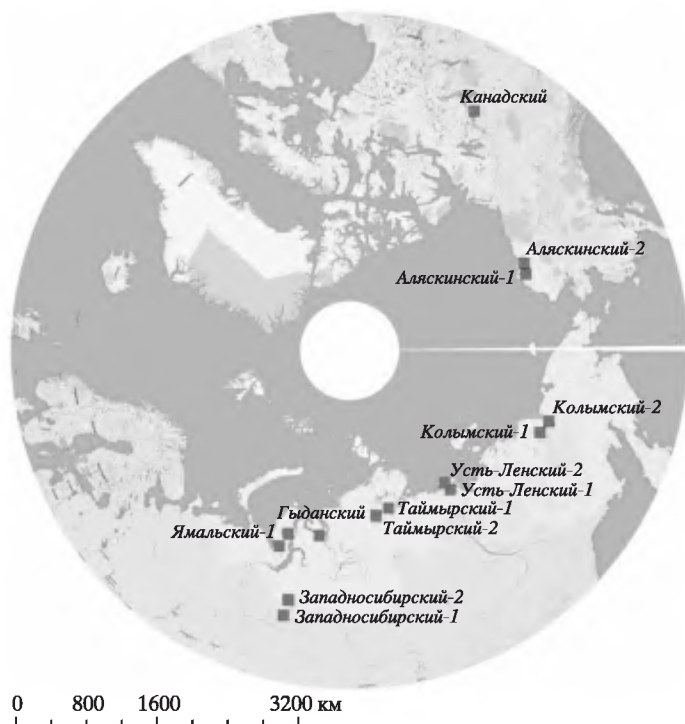


Рис. 2. Обзорная карта эталонных участков

Термокарстовые озера выделялись как автоматизированным методом – на основе программных модулей ARCGIS, так и в ручном режиме. В любом случае после выделения производился дополнительный анализ с целью избежать ошибок дешифрирования, например отчленились участки впадающих в озеро водотоков, которые часто присоединялись к озерам при автоматизированном оконтуривании последних.

Соответствие эмпирически полученных распределений теоретическим проверялось с помощью программного пакета для статистического анализа с использованием критерия Пирсона (хи-квадрат) на основе известной методики при соблюдении условий ее применения (например, [23]). Предварительно по выборке определялись свободные параметры распределения. Затем устанавливалось значение критерия, и полученная величина сравнивалась с критическим значением на уровне значимости 0.95 и 0.99. Критическое значение определялось числом степеней свободы, которое зависело от количества интервалов, на которые разбивалась выборка программой при дефиниции значения критерия и от числа свободных параметров.

Выборка средних радиусов контуров формировалась по выборке площадей с использованием соотношения

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}},$$

где S – площадь озера.

Полученные данные включали выборки объема от 74 до 576 озер. Анализ результатов показывает, что на подавляющем большинстве участков получено логнормальное распределение (14 из 15 на уровне значимости 0.99). Другой вид распределений (“логарифмический”) получен на том же уровне значимости только на одном участке в двух выборках из трех (табл. 2, уч. Западносибирский-2). На рис. 3 графически по-

термокарстовых озер). Этому посвящена иная модель [17], оставшаяся за пределами статьи. Поэтому в основном исключались участки, где существенную роль играет спуск озер с последующим формированием хасыреев. Если на участке были единичные остаточные озера, то они не включались в выборку.

В итоге выбраны участки, разнообразные в геоморфологическом, геокриологическом и физико-географическом отношении, расположенные в пределах водораздельных равнин, речных и морских террас. Они находятся как в области сплошного развития многолетнемерзлых пород, так и в зонах прерывистой и островной мерзлоты.

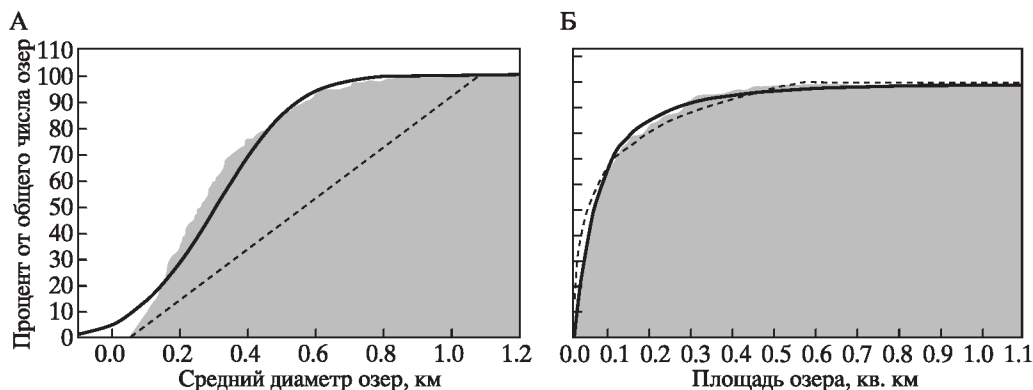


Рис. 3. Пример соответствия эмпирических распределений различным видам теоретических распределений (участок Таймырский-1)

А – средний диаметр озер (сплошная линия – нормальное распределение, пунктир – равномерное распределение, граница закрашенной области – эмпирическая функция распределения), Б – площадь озер (сплошная линия – логнормальное распределение, пунктир – “логарифмическое” распределение, граница закрашенной области – эмпирическая функция распределения)

казан пример соответствия эмпирических распределений различным видам теоретических распределений для одного из участков.

Конечно, данный подход обладает своими недостатками. Так, возможны другие виды функции плотности генерации термокарстовых озер, но в любом случае следовало начать анализ с наиболее простого случая асинхронного старта – равномерной генерации. Также к числу недостатков относится неучет того, что расширение заозеренности (доли площади, занимаемой озерами), происходящее в процессе развития

Таблица 2

Результаты эмпирической проверки распределения параметров термокарстовых озер

Участок	Распределение				Объем выборки	Количество выборок по срокам съемки
	площади озер		радиусов озер			
	логнормаль- ное	“логарифми- ческое”	нормаль- ное	равномер- ное		
Аляскинский-2	+	—	—	—	108	1
Аляскинский-1	+	—	—	—	100	4
Гыданский	+	—	—	—	74	3
Западносибирский-1	+	—	—	—	113	3
Западносибирский-2	+	+/-*	—	—	84	3
Канадский	+	—	—	—	154	1
Колымский-1	+	—	—	—	154	1
Колымский-2	+	—	—	—	576	1
Таймырский-1	+	—	—	—	345	1
Таймырский-2	+	—	—	—	209	1
Усть-Ленский-1 (се- верный)	+	—	—	—	144	1
Усть-Ленский-1 (юж- ный)	+	—	—	—	89	1
Усть-Ленский-2	+	—	—	—	167	1
Ямальский-1	—	—	—	—	214	1
Ямальский-2	+	—	—	—	176	1

Примечание. * – согласуются две из трех выборок.

при асинхронном старте, уменьшает плотность генерации озер⁴, уменьшая площадь, на которой озера могут возникнуть. Однако в целом полученный результат представляется интересным для уточнения процессов развития рельефа и ландшафтов криоли-тозоны.

Выводы

1. Статистические распределения параметров термокарстовых озер на участках озерно-термокарстовых равнин относительно однородных по геоморфологическим, геокриологическим и ландшафтным условиям различны при различных предположе-ниях о развитии озерно-термокарстовых равнин.

2. Анализ эмпирических данных по распределению параметров термокарстовых озер показывает, что наблюдаемые распределения в подавляющем большинстве отве-чают логнормальным распределениям и не согласуются с иными исследуемыми типа-ми распределений.

3. Проведенный анализ заставляет сделать вывод в пользу пропорциональности скорости роста размера термокарстового озера средней плотности тепловых потерь через боковую поверхность в условиях синхронного для каждого участка старта про-цессов возникновения термокарстовых озер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты западной Сибири на основе космических снимков // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 4. С. 1–9.
2. Кравцова В.И., Тарасенко Т.В. Изучение и картографирование динамики термокарстовых озер на территории Западной Сибири по разновременным космическим снимкам // Вось-мое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу // Мат-лы рос. конф. 8–10 октября 2009 г. Томск: Аграф-Пресс, 2009. С. 273–275.
3. Веремева А.А. Закономерности распространения термокарстовых озер тундровых ландшаф-тов Колымской низменности и изменение их заозеренности за последние 40 лет // Тез. докл. всерос. науч. молодежной конф. “Геокриология – прошлое, настоящее, будущее”. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2010. С. 106–108.
4. 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.
5. Капралова В.Н. Использование данных дистанционного зондирования и методов математи-ческой морфологии ландшафта для изучения термокарстовых процессов // Междунар. год планеты Земля: задачи геоэкологии, инж. геологии и гидрогеологии. Сергеевские чтения. М.: ГЕОС, 2008. Вып. 10. С. 430–434.
6. Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты. Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013. 129 с.
7. Кудрявцев В.А. О термокарсте // Вопр. физ. геогр. поляр. стран. 1959. Вып. 1. С. 101–106.
8. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Недра, 1980. 384 с.
9. Томирдиаро С.В. Вечная мерзлота и освоение горных стран и низменностей. Магадан: Ма-гаданск. кн. изд-во, 1972. 174 с.
10. Тумской В.Е., Никольский П.А., Басилян А.Э. и др. Эволюция многолетнемерзлых пород на побережье пролива Дмитрия Лаптева в позднем кайнозое // Тез. конф. “Ритмы природных процессов в криосфере Земли”. Пушкино, 2000. С. 123–125.
11. Тумской В.Е. Термокарст и его роль в развитии региона моря Лаптевых в позднем плейсто-цене и голоцене: Автореф. ... дис. канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2002. 24 с.
12. Burn C.R., Smith M.W. Development of Thermokarst Lakes During the Holocene at Sites Near Mayo, Yukon Territory // Permafrost and Periglacial Processes. 1990. V. 1. P. 161–176.

⁴ Среднее число озер (центров), появляющихся за единицу времени на единице площади.

13. *Makarycheva E., Sergeev D., Kapralova V., Jin H.* Water level regime of thermokarst lakes in the mountain areas // Book of Abstracts of EUCOP4 – 4th European Conference on Permafrost, Evora, Portugal. 2014. P. 206.
14. *Стрелецкая И.Д., Туркина О.С.* Мерзлотные плоскобугристые торфяники Надым-Пуровского междуречья Западной Сибири // Исслед. мерзлых грунтов в районах освоения. М.: Стройиздат, 1987. С. 41–49.
15. *Воскресенский К.С.* Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России: Автореф. ... дис. докт. геогр. наук. М.: МГУ, 1999. 40 с.
16. *Викторов А.С.* Математическая морфология ландшафта. М.: ТРАТЕК, 1998. 180 с.
17. *Викторов А.С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
18. *Капралова В.Н.* Закономерности развития термокарстовых процессов в пределах озерно-термокарстовых равнин (на основе подходов математической морфологии ландшафта: Автореф. ... дис. канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЭ РАН, 2014. 24 с.
19. *Перльштейн Г.З., Павлов А.В., Левашов А.В., Сергеев Д.О.* Нетемпературные факторы теплообмена деятельного слоя с атмосферой // Мат-лы третьей конф. геокриологов России. 1–3 июня 2005 г. М.: Изд-во МГУ, 2005. С. 86–91.
20. Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1:200000 (1:100000–1:500000). М.: Недра, 1978. 391 с.
21. *Корольюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В. и др.* Справочник по теории вероятности и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640 с.
22. *Карлин С.* Основы теории случайных процессов. М.: Мир, 1971. 536 с.
23. *Краммер Г.* Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.

Поступила в редакцию 8.12.2014

AN ANALYSIS OF THE MORPHOLOGICAL STRUCTURE DEVELOPMENT OF THE THERMOKARST-LAKE PLAINS ON THE BASE OF THE MATHEMATICAL MODEL

A.S. VIKTOROV, V.N. KAPRALOVA, T.V. ORLOV, O.N. TRAPEZNIKOVA, M.V. ARHIPOVA,
P.V. BEREZIN, A.V. ZVEREV, E.N. PANCHENKO, S.A. SADKOV

Summary

We analyzed different hypotheses of the thermokarst-lake plains development using mathematical modeling of their morphological pattern. Two different assumptions of thermokarst depressions growth were considered: 1) synchronous start, when period of emergence of initial lakes is relatively short compared with the period of their further development, and the number of depressions remains constant; 2) asynchronous start, when new thermokarst lakes appear permanently. Theoretical statements were empirically tested using real thermokarst lakes parameters at the 16 test sites in different permafrost regions. The analysis of the model and empirical testing of the results demonstrated prevailing lognormal distribution of thermokarst lakes areas and proved the synchronous lakes emergence on the assumption that the rate of the lakes growth is proportional to the density of thermal losses through the side surface of the lake.

Keywords: mathematical model, morphological structure, thermokarst-lake plains.

doi:10.15356/0435-4281-2015-3-3-13