

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЭРОЗИОННО-ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННЫХ СЪЕМОК

© 2019 г. А. С. Викторов\*, В. Н. Капралова\*\*, М. В. Архипова\*\*\*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева  
Российской академии наук, Москва, Россия*

*\*E-mail: vic\_as@mail.ru*

*\*\*E-mail: vkapralova@gmail.com*

*\*\*\*E-mail: masha-a@yandex.ru*

Поступила в редакцию 04.03.2019 г.

Цель статьи — изложить результаты разработки математической модели развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин на основе подходов математической морфологии ландшафта с использованием данных дистанционного зондирования. На основании теоретического анализа была разработана модель развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин и эмпирически проверена на ряде ключевых участков. Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что в разных физико-географических, геологических и геокриологических условиях теоретические результаты об экспоненциальном распределении площадей хасыреев подтверждаются эмпирически и о том, что распределение площадей термокарстовых озер в пределах эрозионно-термокарстовых равнин соответствует как гамма-распределению, так и лог-нормальному распределению. Показано, что распределение средних радиусов и диаметров хасыреев должно отвечать распределению Рэля. Анализ показывает, что на выбранных участках наиболее часто реализуется вариант с синхронным стартом термокарстовых процессов. Также разработанная модель позволяет дать оценку динамических параметров процессов по значениям ландшафтных метрик одного временного среза.

**Ключевые слова:** математическая морфология ландшафта, эрозионно-термокарстовые равнины, математические модели морфологических структур, данные дистанционного зондирования

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019255-64>

#### ВВЕДЕНИЕ

Термокарстовые равнины широко распространены в пределах территорий залегания многолетнемерзлых пород. Исследования термокарстовых равнин затрагивали прежде всего озерно-термокарстовые равнины (Ф.Э. Арэ, С.Р. Burn, М.В. Smith, В.Ю. Полищук и Ю.М. Полищук, А.С. Викторов, В.Н. Капралова., В.И. Кравцова, Т.В. Тарасенко, С.Н. Кирпотин, Н.А. Брыксина и др.). Эрозионно-термокарстовые равнины более сложная и динамичная территория, которая характеризуется неравномерным промерзанием и оттаиванием многолетнемерзлых пород, связанным с деятельностью эрозионной сети, спуском озер и появлением хасыреев (вырожденный очаг развития термокарстового процесса) (Романовский, 1961; Викторов, 2016). В пределах этого ландшафта сочетаются противоположные тенденции:

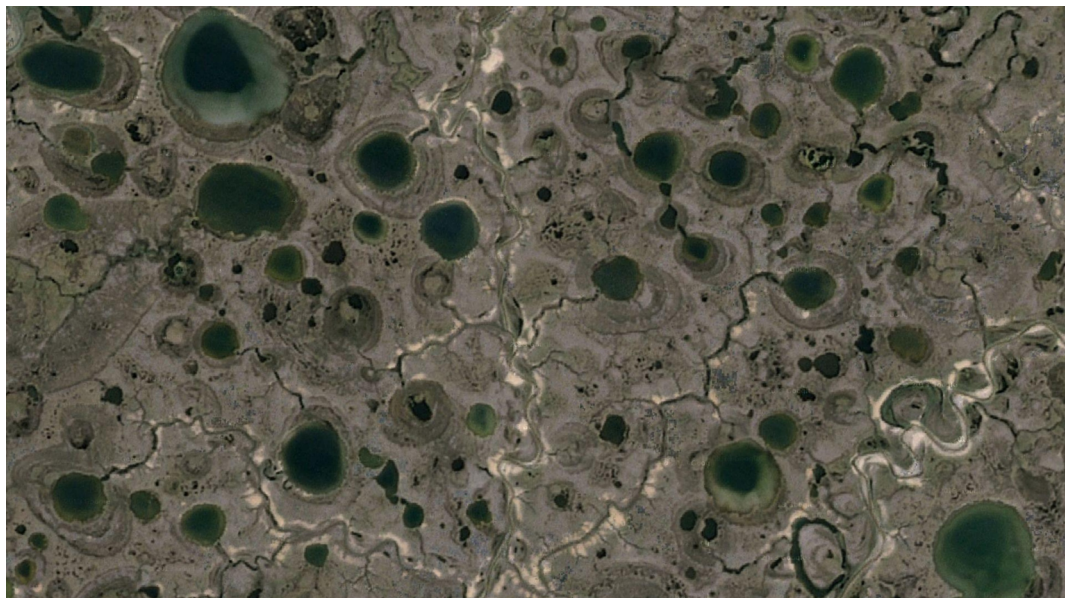
– расширение и в ряде случаев увеличение числа термокарстовых озер,

– спуск и уменьшение числа термокарстовых озер из-за эрозионных процессов.

Это делает анализ развития и прогнозирование изменения эрозионно-термокарстовых равнин особенно сложным. Применение математической морфологии ландшафта и данных дистанционного зондирования может дать перспективные результаты для моделирования поведения эрозионно-термокарстовых равнин и с точки зрения оценки риска поражения процессом различных инженерных сооружений.

Целью исследований являлась разработка математической модели развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин на основе подходов математической морфологии ландшафта с использованием материалов дистанционных съемок.

Исследуемый тип территорий представляет собой слабоволнистую субгоризонтальную поверхность с преобладанием различной тундровой растительности (пушицевые тундры,



**Рис. 1.** Типичное изображение эрозионно-термокарстовой равнины на космическом снимке.

осоково-пушицевые тундры и др.), в которую вкраплены озера и хасыреи, а также местами развита нечастая эрозионная сеть. Озера имеют изометричную, часто округлую форму и беспорядочно разбросаны по равнине. Хасыреи представляют собой плоскодонные и пологосклонные заторфованные понижения, также изометричной формы, занятые луговой или болотной растительностью и аналогично озерам в беспорядке располагающиеся на равнине. В соответствии со взглядами большинства исследователей, хасыреи образуются в результате осушения термокарстовых озер, чаще всего в результате эрозионной деятельности водотоков.

Хасыреи часто имеют террасированный ступенчатый рельеф, связанный с сокращением площади и понижением уровней озер. Внутри хасыреев могут оставаться мелкие остаточные озера по периферии и крупные озера в центральной части. В пределах хасыреев возможно вторичное формирование мерзлоты и развитие бугров пучения. Типичный вид эрозионно-термокарстовой равнины на материалах космической съемки приведен на рис. 1.

Рассматриваемый ландшафт находится под влиянием термокарстовых, термоабразионных и термоэрозионных процессов, которые находятся в сложном взаимодействии. На территории возникают термокарстовые понижения, которые заполняются водой и растут независимо друг от друга как озера за счет термоабразионных процессов. Рост регулируется случайными факторами, связанными с развитием метеорологических процессов конкретного года и грунтовыми условиями. Наконец, в случайный момент времени озеро

может быть спущено эрозионными процессами и превращается в хасырей — постозерную котловину, зарастающую лугово-болотной растительностью с отдельными остаточными озерами, при этом рост котловины останавливается из-за отсутствия водной массы. Одновременно хасырей снова становится ареной новообразования мерзлоты.

Переход озера в хасырей происходит, конечно, не мгновенно, но рост понижения останавливается очень быстро — как только границы водного зеркала отходят от края понижения.

В целом территория предстает как сложная мозаика участков, которые в разное время прошли озерные стадии и стадии хасыреев.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭРОЗИОННО-ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН

Рассмотрим формирование морфологической структуры эрозионно-термокарстовой равнины в варианте синхронного старта, где мы предполагаем, что возникновение первичных термокарстовых понижений происходило относительно короткое время (по сравнению с их дальнейшим развитием). Как показали исследования озерно-термокарстовых равнин, распределение площади озер на них делает более вероятной гипотезу именно близкого к синхронному началу термокарстовых процессов (Викторов, Капралова и др., 2015). В этом случае модель морфологической структуры ландшафта может базироваться на следующих предположениях:

1. Процесс появления термокарстовых понижений происходил за короткий отрезок времени

(«синхронный старт»); он являлся вероятностным и на непересекающихся площадках шел 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<sup>1</sup>:

$$p_1 = \tau_i^0 \Delta s + o(\Delta s),$$

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

где  $\tau_i^0$  — средняя исходная (в момент начала термокарстовых процессов «синхронного старта») плотность расположения термокарстовых озер.

2. Изменение радиуса возникшего термокарстового понижения представляет собой случайный процесс; оно происходит независимо от других озер, и его скорость пропорциональна плотности тепловых потерь через боковую (залитую) поверхность озерной котловины.

3. В процессе роста озеро может перейти в хасырей (при его спуске эрозионной сетью), вероятность этого не зависит от других озер; при этом рост озера прекращается.

4. Возникновения истоков эрозионных форм на непересекающихся площадках являются независимыми случайными событиями; вероятность наличия истока на пробной площадке зависит только от ее площади и много больше, чем вероятность наличия более, чем одного истока<sup>2</sup>.

В модели рассматривается упрощенный случай относительного постоянства климатических условий.

Анализ модели позволяет получить основные выражения, описывающие строение и динамику морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин в варианте синхронного старта. В качестве исходного момента мы базируемся на том, что из двух первых предположений модели вытекает (Викторов, 1995), что свободный рост озера описывается следующим распределением радиуса через время  $t$

$$f_0(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x\sqrt{t}}} e^{-\frac{(\ln x - at)^2}{2\sigma^2 t}}$$

а число на пробной площадке первичных понижений, возникших при старте на территории

<sup>1</sup> Точнее вероятность возникновения более чем одного понижения является бесконечно малой более высокого порядка, чем вероятность возникновения одного понижения.

<sup>2</sup> В смысле аналогичном сноске 1.

термокарстового процесса, — распределением Пуассона

$$P(k) = \frac{(\tau_i^0 S)^k}{k!} e^{-\tau_i^0 S}$$

где  $a, \sigma$  — параметры распределения,  $t$  — время, прошедшее с начала процесса,  $S$  — площадь пробной площадки,  $\tau_i^0$  — средняя исходная (в момент начала термокарстовых процессов «синхронного старта») плотность расположения термокарстовых озер.

Определим распределение расстояния от центра растущего очага до ближайшего истока эрозионной формы. Последнее предположение модели позволяет сделать вывод, что распределение числа истоков эрозионных форм на случайно выбранной площадке отвечает, как показано ранее (Victorov, Trapeznikova, 2000), распределению Пуассона

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

где  $\gamma$  — средняя плотность расположения истоков эрозионных форм,  $S$  — площадь пробной площадки.

Распределение расстояния от центра растущего очага до ближайшего истока эрозионной формы, останавливающего рост озера с превращением в хасырей, может быть получено, если учесть, что событие «расстояния от центра растущего очага до ближайшего истока эрозионной формы больше или равно  $x$ » эквивалентно событию «круг радиуса  $x$  из центра растущего очага не содержит истоков». Вероятность последнего события может быть определена исходя из предыдущего выражения, если принять  $k$  равным нулю. В итоге, перейдя к дополнительному событию, получаем, что распределение расстояния от центра растущего очага до ближайшего истока эрозионной формы отвечает закону Рэлея

$$F(x) = 1 - e^{-\pi\gamma x^2}.$$

Представляет интерес распределение радиусов хасыреев. В произвольный момент времени распределение радиусов хасыреев определяется расстоянием до ближайшего истока эрозионной формы, который остановит рост (первый член в подынтегральном выражении), и вероятностью того, что в процессе роста озеро достигнет размеров, превышающих это расстояние (второй член в подынтегральном выражении),

$$F_h(x, t) = \frac{\int_0^x 2\pi\gamma u e^{-\pi\gamma u^2} [1 - F_0(u, t)] du}{\int_0^{+\infty} 2\pi\gamma u e^{-\pi\gamma u^2} [1 - F_0(u, t)] du},$$



где  $F_0(x, t)$  — распределение радиуса свободно растущего термокарстового озера в момент  $t$ , соответственно плотность распределения составит

$$f_h(x, t) = \frac{2\pi\gamma x e^{-\pi\gamma x^2} [1 - F_0(x, t)]}{\int_0^{+\infty} 2\pi\gamma u e^{-\pi\gamma u^2} [1 - F_0(u, t)] du}.$$

С увеличением времени ( $t \rightarrow \infty$ ) распределение радиусов хасыреев стремится к некоторому предельному распределению. Нетрудно видеть, что, поскольку для любого значения  $x$  распределение размеров озера при свободном росте стремится к нулю, то предельная плотность распределения радиусов хасыреев при большом времени развития территории определяется выражением

$$f_h(x, \infty) = 2\pi\gamma x e^{-\pi\gamma x^2},$$

а само распределение — выражением

$$F_h(x, \infty) = 1 - e^{-\pi\gamma x^2}.$$

Иначе говоря, при большом времени развития распределение радиусов хасыреев должно отвечать распределению Рэля или быть близким к нему. Отсюда может быть получено распределение площадей хасыреев ( $sh$ ). Учитывая, что

$$F_{sh}(x, \infty) = F_h\left(\sqrt{\frac{x}{\pi}}, \infty\right),$$

нетрудно получить, что распределение площади хасырея отвечает экспоненциальному распределению

$$F_{sh}(x, \infty) = 1 - e^{-\gamma x}. \quad (1)$$

Представляет интерес *распределение радиусов термокарстовых озер*. В произвольный момент времени распределения радиусов термокарстовых озер определяется распределением соответствующего радиуса в условиях свободного роста, но при условии, что озеро не станет хасыреем, то есть, что расстояние до истока будет больше радиуса озера. Таким образом, плотность распределения радиуса термокарстового озера дается выражением

$$f_l(x, t) = \frac{f_0(x, t) e^{-\pi\gamma x^2}}{\int_0^{+\infty} f_0(u, t) e^{-\pi\gamma u^2} du}.$$

Используя выражение для свободного роста и упрощая за счет одинаковых членов в числителе и знаменателе, зависящих только от времени, получаем

$$f_l(x, t) = \frac{x^{\frac{a}{\sigma^2}-1} e^{-\pi\gamma x^2} e^{-\frac{\ln^2 x}{2\sigma^2 t}}}{\int_0^{+\infty} x^{\frac{a}{\sigma^2}-1} e^{-\pi\gamma x^2} e^{-\frac{\ln^2 x}{2\sigma^2 t}} dx},$$

где  $a, \sigma$  — параметры распределения.

При значительном времени развития ( $t \rightarrow +\infty$ ) это выражение стремится к предельному распределению

$$f_l(x, \infty) = \frac{x^{\frac{a}{\sigma^2}-1} e^{-\pi\gamma x^2}}{\int_0^{+\infty} x^{\frac{a}{\sigma^2}-1} e^{-\pi\gamma x^2} dx},$$

в котором нетрудно узнать известное хи-распределение. Отсюда с учетом круговой формы озера получаем соотношение

$$f_{sl}(x, \infty) = \frac{1}{2\sqrt{\pi x}} f_l\left(\sqrt{\frac{x}{\pi}}, \infty\right),$$

из которого следует, что предельным распределением для площади озера ( $sl$ ) является гамма-распределение

$$f_{sl}(x, \infty) = \frac{\gamma^{\frac{a}{2\sigma^2}} x^{\frac{a}{2\sigma^2}-1} e^{-\gamma x}}{\Gamma\left(\frac{a}{2\sigma^2}\right)}, \quad (2)$$

где  $\Gamma(x)$  — гамма-функция.

Пространственное расположение озер отвечает, как и в модели озерно-термокарстовых равнин, пуассоновскому распределению все время в процессе развития. Это вытекает из первого предположения модели. Однако средняя плотность расположения озер все время уменьшается из-за их превращения в хасыреи. Ее значение определяется распределением длительности существования озера, которое по сути дела представляет собой вероятность превращения за заданное время озера в хасырей, и дается выражением

$$\tau_l(t) = \tau_l^0 \int_0^{+\infty} 2\pi\gamma x e^{-\pi\gamma x^2} F_0(x, t) dx.$$

Соответственно *плотность расположения хасыреев* дается выражением

$$\tau_h(t) = \tau_l^0 \left[ 1 - \int_0^{+\infty} 2\pi\gamma x e^{-\pi\gamma x^2} F_0(x, t) dx \right].$$

Таким образом, на основе предположений модели удалось получить основные выражения, описывающие строение и динамику морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин в варианте синхронного старта:

— распределение радиусов термокарстовых озер при большом времени развития участка отвечает хи-распределению, и площадей — гамма-распределению,

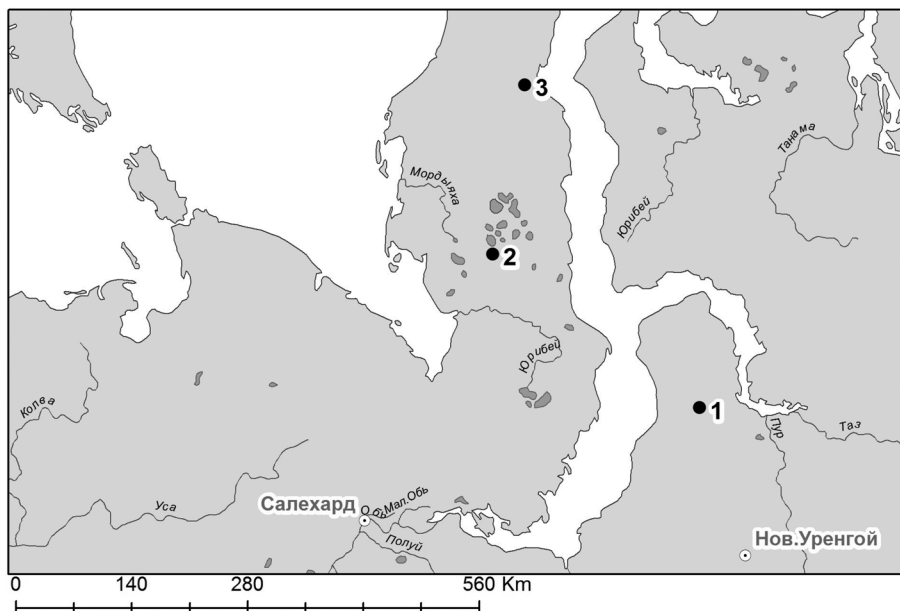


Рис. 2. Обзорная картосхема расположения ключевых участков эрозионно-термокарстовых равнин.

— распределение радиусов хасыреев при большом времени развития участка соответствует распределению Рэлея, и площадей — экспоненциальному распределению,

— распределение числа озер и числа хасыреев на случайно выбранной площадке — распределению Пуассона.

### ЭМПИРИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА

Полученные выводы были проверены на нескольких ключевых участках с помощью критерия согласия Пирсона. Для экспериментального исследования были выбраны 3 участка в различных регионах (рис. 2).

При выборе участков, мы руководствовались следующими критериями:

— геолого-геоморфологическая однородность участка (генетическая и морфологическая однородность, однотипность состава поверхностных отложений, обоснованная фондовыми и литературными данными);

— морфологическая однородность изображения участка (внутреннее однообразие участка по микроструктуре и фототону фона на космоснимках, а также по расположению и форме озер);

— наличие данных дистанционного зондирования необходимого разрешения;

— разнообразие геологических, геокриологических и физико-географических условий, в которых находятся разные участки.

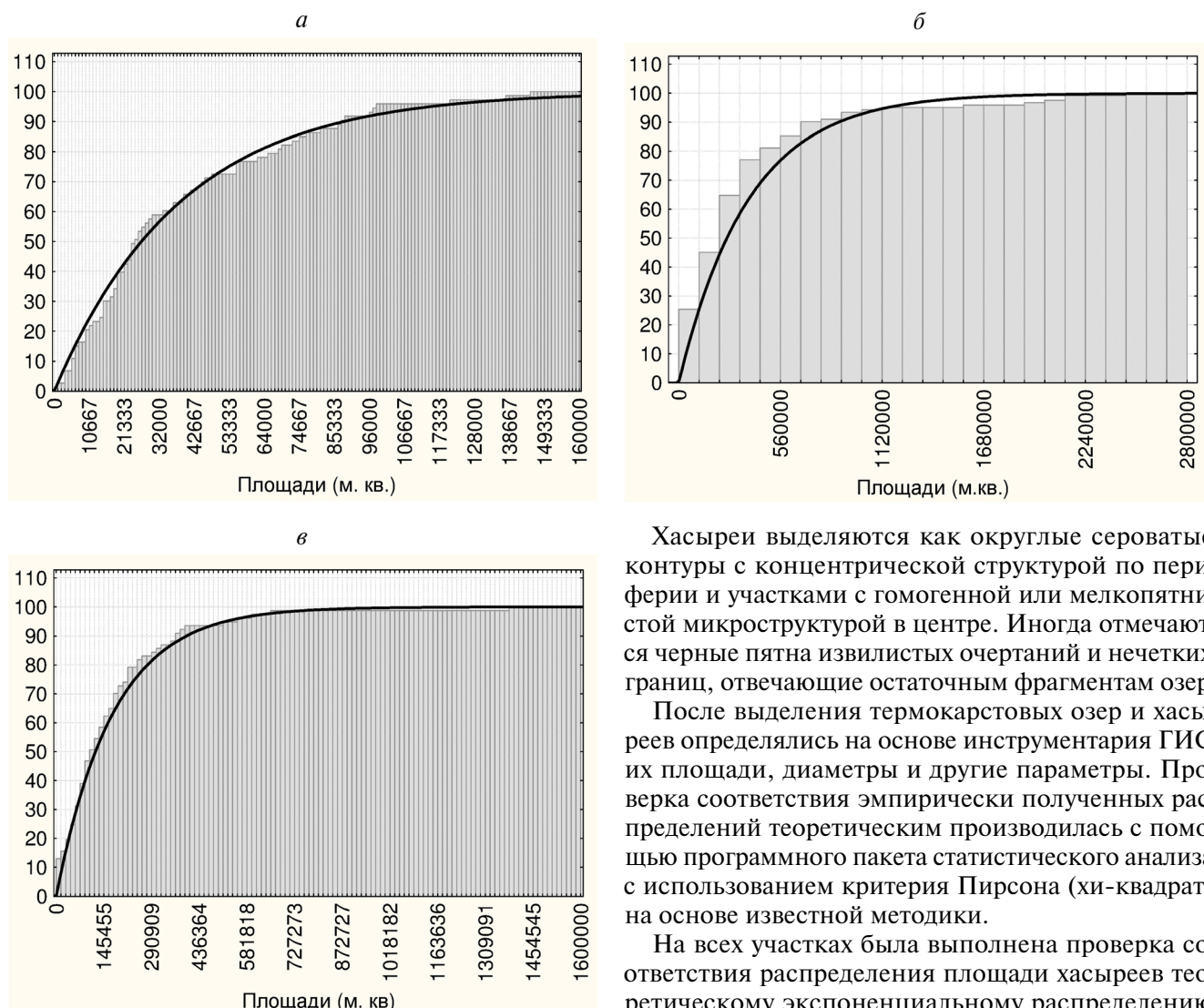
При отнесении озер к термокарстовым использовались известные дешифровочные признаки на

материалах дистанционных съемок (Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1:200000, 1978).

В качестве источника информации о морфологической структуре исследуемой территории были использованы космические снимки с различных спутников с пространственным разрешением 5–30 м.

Первый участок относится к территории Тазовского полуострова и сложен преимущественно морскими отложениями. Участки 2 и 3 расположены на полуострове Ямал — на Гыданском полуострове. Участок 2 находится в центральной части полуострова. Он вытянут с юго-запада на северо-восток и занимает междуречье рек Ясавэйяха и Нядэйседаяха. В геологическом отношении поверхность сложена морскими отложениями (преимущественно песками). Участок 3 расположен в северной половине полуострова на его восточном побережье. Участок занимает левобережье р. Сабетаяха. В геологическом отношении поверхность сложена аллювиально-морскими отложениями второй террасы также преимущественно песками.

Выделение хасыреев и термокарстовых озер производилось на основе программных модулей QGIS в ручном режиме. Термокарстовые озера выделяются как контуры черного цвета гомогенной структуры, обычно круговой или округлой формы; нередко по границе отмечается кольцевая окрестность серого цвета также гомогенная и иногда серия концентрических пунктирных колец черного цвета. Последний элемент отвечает периферии озерной котловины со следами береговых линий.



**Рис. 3.** Пример соответствия эмпирических распределений площади хасыреев теоретическому экспоненциальному распределению: *a* — участок 1, *б* — участок 2, *в* — участок 3.

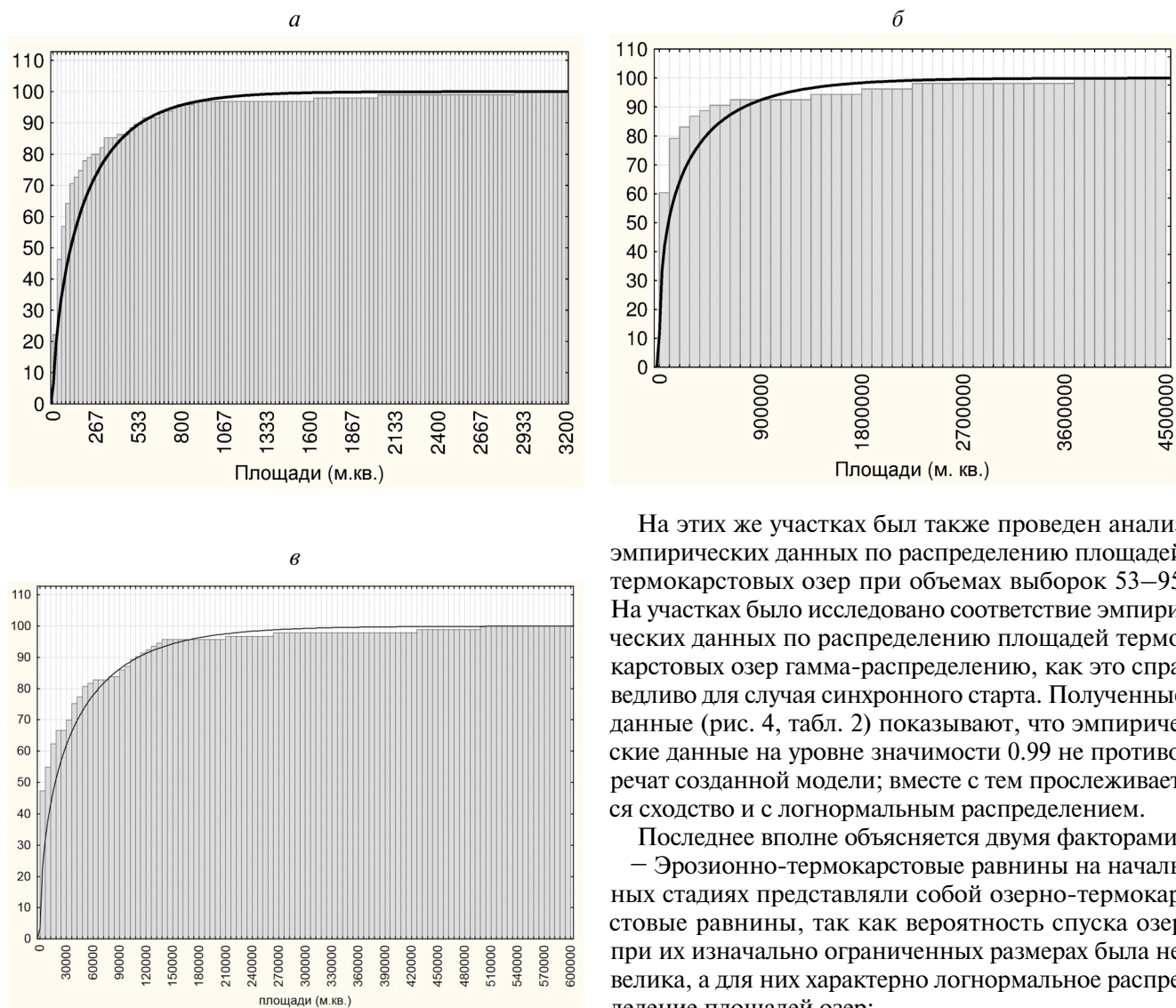
Хасыреи выделяются как округлые сероватые контуры с концентрической структурой по периферии и участками с гомогенной или мелкопятнистой микроструктурой в центре. Иногда отмечаются черные пятна извилистых очертаний и нечетких границ, отвечающие остаточным фрагментам озер.

После выделения термокарстовых озер и хасыреев определялись на основе инструментария ГИС их площади, диаметры и другие параметры. Проверка соответствия эмпирически полученных распределений теоретическим производилась с помощью программного пакета статистического анализа с использованием критерия Пирсона ( $\chi^2$ -критерий) на основе известной методики.

На всех участках была выполнена проверка соответствия распределения площади хасыреев теоретическому экспоненциальному распределению (рис. 3) при объемах выборок 73–122. Анализ показывает соответствие эмпирических данных полученным результатам на уровне значимости 0.95 (табл. 1).

**Таблица 1.** Таблица соответствия теоретических и эмпирических законов распределения площадей хасыреев

| Участок   | Объем выборки | Вид распределения              | $\chi^2$ | $\chi^2_{0.95}$ |
|-----------|---------------|--------------------------------|----------|-----------------|
| Участок 1 | 73            | Экспоненциальное распределение | 8.697    | 12.592          |
|           |               | Логнормальное распределение    | 11.372   | 11.070          |
|           |               | Нормальное распределение       | 20.319   | 11.070          |
| Участок 2 | 122           | Экспоненциальное распределение | 7.315    | 14.067          |
|           |               | Логнормальное распределение    | 6.661    | 12.592          |
|           |               | Нормальное распределение       | 149.362  | 11.070          |
| Участок 3 | 76            | Экспоненциальное распределение | 1.324    | 7.815           |
|           |               | Логнормальное распределение    | 8.750    | 5.991           |
|           |               | Нормальное распределение       | 58.936   | 9.488           |



На этих же участках был также проведен анализ эмпирических данных по распределению площадей термокарстовых озер при объемах выборок 53–95. На участках было исследовано соответствие эмпирических данных по распределению площадей термокарстовых озер гамма-распределению, как это справедливо для случая синхронного старта. Полученные данные (рис. 4, табл. 2) показывают, что эмпирические данные на уровне значимости 0.99 не противостоят созданной модели; вместе с тем прослеживается сходство и с логнормальным распределением.

Последнее вполне объясняется двумя факторами:

- Эрозионно-термокарстовые равнины на начальных стадиях представляли собой озерно-термокарстовые равнины, так как вероятность спуска озер при их изначально ограниченных размерах была невелика, а для них характерно логнормальное распределение площадей озер;
- Гамма-распределение является предельным распределением при  $t \rightarrow \infty$ , а прошедшее с начала термокарстового процесса время является хотя и большим, но конечным.

**Рис. 4.** Пример соответствия эмпирических распределений площади термокарстовых озер гамма-распределению: *a* – участок 1, *б* – участок 2, *в* – участок 3.

**Таблица 2.** Таблица соответствия теоретических и эмпирических законов распределения для термокарстовых озер

| Участок   | Количество озер | Вид распределения           | $\chi^2$ | $\chi^2_{0.99}$ |
|-----------|-----------------|-----------------------------|----------|-----------------|
| Участок 1 | 95              | Гамма-распределение         | 5.799    | 6.635           |
|           |                 | Логнормальное распределение | 2.848    | 9.210           |
|           |                 | Нормальное распределение    | 27.423   | 9.210           |
| Участок 2 | 53              | Гамма-распределение         | 6.317    | 9.210           |
|           |                 | Логнормальное распределение | 6.464    | 6.635           |
|           |                 | Нормальное распределение    | 149.362  | 15.086          |
| Участок 3 | 93              | Гамма-распределение         | 3.802    | 6.635           |
|           |                 | Логнормальное распределение | 10.807   | 11.341          |
|           |                 | Нормальное распределение    | 27.350   | 18.475          |



## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученный результат позволяет использовать его при оценке динамических параметров процессов по значениям ландшафтных метрик одного временного среза (один срок съемки или обследования) в пределах территории эрозионно-термокарстовых равнин. Одним из параметров динамики термокарстового процесса является соотношение  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{a}{\sigma^2}.$$

Это соотношение не может быть прямо определено без длительных стационарных наблюдений. Полученная модель позволяет это сделать. Найдем математическое ожидание средней площади озер, используя предельное распределение (2). В соответствии с известными выражениями для гамма-распределения оно равно

$$M\xi_{sl} = \frac{a}{2\sigma^2\gamma}.$$

Математическое ожидание площади хасырея согласно (1) составляет

$$M\xi_{sh} = \frac{1}{\gamma}.$$

Соответственно искомое соотношение может быть получено на основе ландшафтных метрик средней площади озер ( $M\xi_{sl}$ ) и средней площади хасыреев ( $M\xi_{sh}$ ), получаемых по однократному временному срезу

$$\varepsilon = \frac{2M\xi_{sl}}{M\xi_{sh}}.$$

Таким образом, для определения динамического параметра  $\varepsilon$  — соотношения растущих среднего логарифма радиуса термокарстового озера и его дисперсии при свободном росте озера — достаточно воспользоваться соотношением средней площади термокарстового озера и средней площади хасырея.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании теоретического анализа и полученных эмпирических данных, проведенный на основе материалов космической съемки анализ развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин позволил сделать следующие выводы:

— в разных физико-географических, геологических и геокриологических условиях, распределение площадей хасыреев подчиняется экспоненциальному закону, что подтверждается экспериментально; с рядом других распространенных законов распределения сходства не наблюдается,

— распределение средних радиусов и диаметров хасыреев должно отвечать распределению Рэлея,

— распределение площадей термокарстовых озер в пределах эрозионно-термокарстовых равнин соответствует как гамма-распределению, так и логнормальному распределению,

— на выбранных участках наиболее часто реализуется вариант с синхронным стартом термокарстовых процессов,

— разработанная модель позволяет дать оценку динамических параметров процессов по значениям ландшафтных метрик одного временного среза,

— материалы космических съемок являются уникальной основой для создания математических моделей морфологических структур и выявления их закономерностей.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18–000226 в отношении создания модели и гранта РФФИ № 18-05-00723 в отношении анализа возможности получения информации о динамических параметрах процессов на основе ландшафтных метрик.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арз Ф.Э., Балобаев В.Т., Босиков Н.П. Особенности переработки берегов термокарстовых озер Центральной Якутии // Озера криолитозоны Сибири. Новосибирск: Наука, 1974, с. 39–52.
- 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.
- Викторов А.С. Капралова В.Н. Количественная оценка природных рисков на основе материалов космических съемок (на примере озерно-термокарстовых равнин) // Исследование Земли из космоса. 2013. № 4. С. 33–38.
- 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.
- Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н., Архипова М.В., Березин П.В., Зверев А.В., Садков С.А., Панченко Е.Г. Математическая морфология ландшафтов криолитозоны. М.: Изд-во РУДН, 2016. 230 с.
- Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления // Вестник ТГУ. 2008. № 311. С. 185–189.



*Кравцова В.И., Тарасенко Т.В.* Изучение и картографирование динамики термокарстовых озер на территории Западной Сибири по разновременным космическим снимкам // Восьмое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Материалы российской конференции 8-10 октября 2009 г. Томск: Аграф-Пресс, 2009, с. 273–275.

Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1:200000 (1:100000-1:500000) М.: Недра, 1978. - 391 с.

*Полищук В.Ю., Полищук Ю.М.* Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты. Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013, 129 с.

*Романовский Н.Н.* Эрозионно-термокарстовые котловины на севере приморских низменностей Якутии и Новосибирских островах // Мерзлотные исследования, вып. 1, М.: Изд-во МГУ, 1961, с. 124–144.

*Шур Ю.Л.* Термокарст (к теплофизическим основам учения о закономерностях развития процесса) М.: Недра, 1977, 80 с.

*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.

*Smith L.C., Sheng Y., Macdonald G.M., Hinzman L.D.* Disappearing Arctic lakes // Science. 2005. V. 308. № 3. P. 14.

*Viktorov A.S., Trapeznikova O.N.* The erosion plain mathematical model as a base for space image interpretation methods in geoenvironmental research. Proceedings of the 4th international symposium on environmental geotechnology and global sustainable development, Boston, Lowell, 2000.

## Dynamic Modeling for the Morphological Pattern of Thermokarst Plains with Fluvial Erosion on the Base of Remote Sensing Data

A. S. Viktorov, V. N. Kapralova, M. V. Arkhipova

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Moscow, Russia*

The paper deals with the results of the analysis of the dynamic mathematical model for the morphological pattern of thermokarst plains with fluvial erosion basing on the mathematical morphology of landscape approach and remote sensing data. The theoretical analysis resulted in the dynamic mathematical model for the morphological pattern of thermokarst plains with fluvial erosion, which was empirically tested at a set of the key sites. The empirical testing confirms the theoretical results about the exponential distribution of khasyrei areas in different natural environments with a broad geological and geocryological spectrums. Moreover, the area distribution of thermokarst lakes obeys both gamma and lognormal distributions. We have found that the average radius and diameter distributions should be the Raleigh one. The analysis shows that the variant of the thermokarst synchronous start is the most common for the taken key sites. Besides, the model allows us to assess certain dynamic parameters of the processes using landscape metrics from a single time slice.

**Keywords:** mathematical morphology of landscape, thermokarst plains with fluvial erosion, mathematical model for the morphological pattern, remote sensing data

### REFERENCES

*Are F.E., Balobaev V.T., Bosikov N.P.* Osobennosti pererabotki beregov termokarstovykh ozer Tsentralnoy Yakutii // Ozera kriolitozony Sibiri [Peculiarities of processing the shores of thermokarst lakes in Central Yakutia // Siberian Cryolithozone lakes]. Novosibirsk: Nauka, 1974, S.39–52. (In Russian).

*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.

*Kirpotin S.N., Polishchuk Yu.M., Bryksina N.A.* Dinamika ploshchadey termokarstovykh ozer v sploshnoy i preryvnoy poteplyeniya [Dynamics of areas of thermokarst lakes in continuous and intermittent cryolithozone of Western Siberia in the context of global warming] // Vestnik TGU. 2008. № 311. S. 185–189. (In Russian).

*Kravtsova V.I., Tarasenko T.V.* Izuchenie i kartografirovaniye dinamiki termokarstovykh ozer na territorii Zapadnoy Sibiri

po raznovremennym kosmicheskim snimkam // Vosmoe sibirskoe soveshchaniye po klimato-ekologicheskomu monitoringu. Materialy rossiyskoy konferentsii 8-10 oktyabrya 2009 g. The eighth Siberian meeting on climate and environmental monitoring. Materials of the Russian conference, October 8-10, 2009. Tomsk: Agraf-Press, 2009, S. 273–275. (In Russian).

Metodicheskie rekomendatsii po inzhenerno-geologicheskoy syemke mashtaba 1:200 000 [Guidelines for geotechnical surveys of scale 1:200 000], 1976. (In Russian).

*Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M.* Geoimitatsionnoye modelirovaniye poley termokarstovykh ozer v zonakh merzloty [Geo-simulation modeling of thermokarst lakes fields in permafrost zones]. Khanty-Mansiysk: UIP YuGU, 2013, 129 s. (In Russian).

*Romanovsky N.N.* Eroziyonno-termokarstovyye kotlovinyy na severe primorskikh nizmennostey Yakutii i Novosibirskikh ostrovakh [Erosion-thermokarst hollows in the north of the coastal lowlands of Yakutia and the Novosibirskie Islands] //

Merzlotnye issledovaniya. vyp. 1. M.: Izdatelstvo MGU, 1961, S. 124–144. (In Russian).

*Shur Yu.L.* Termokarst (k teplofizicheskim osnovam ucheniya o zakonomernostyakh rasvitiya protsessa Thermokarst (to the thermophysical fundamentals of the theory of the development of the process) M.: Nedra, 1977, 80 c. (In Russian).

*Smith L.C., Sheng Y., Macdonald G.M., Hinzman L.D.* Disappearing Arctic lakes // *Science*. 2005. V. 308. № 3. P. 14.

*Viktorov A.S.* Matematicheskaya model termokarstovykh ozernykh ravnin kak odna iz osnov interpretatsii materialov kosmicheskikh syemok [Mathematical model of thermokarst lake plains as one of the foundations for the interpretation of materials from space imagery]. *Issled. Zemli iz kosmosa*. 1995. № 5. S. 42–50. (In Russian).

*Viktorov A.S., Kapralova V.N.* Kolichestvennaya otsenka prirodnykh riskov na osnove materialov kosmicheskikh syemok (na primere ozerno-termokarstovykh ravnin) [Quantitative assessment of natural risks based on materials of space

surveys (using the example of lake-thermokarst plains)] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2013. № 4. s. 33-38. (In Russian).

*Viktorov 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 morfologicheskoy struktury ozerno-termokarstovykh ravnin na osnove matematicheskoy modeli [Analysis of the development of the morphological structure of the lake-thermokarst plains on the basis of a mathematical model] // *Geomorfologiya*. 2015. № 3. S. 3–13. (In Russian).

*Viktorov A.S., Kapralova V.N., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Arkhipova M.V. Berezin P.V., Zverev A.V., Sadkov S.A., Panchenko E.N.* Matematicheskaya morfologiya landshaftov kriozony [Mathematical morphology of cryolithozone landscapes] M.: Izdatelstvo RUDN, 2016. 230 s. (In Russian).

*Viktorov A.S., Trapeznikova O.N.* The erosion plain mathematical model as a base for space image interpretation methods in geoenvironmental research. *Proceedings of the 4th international symposium on environmental geotechnology and global sustainable development, Boston, Lowell, 2000.*