

УДК 004.942:528.8

Прогнозирование динамики термокарстовых озёр в зоне многолетней мерзлоты на основе космических снимков и математического моделирования

С.Н. Кирпотин¹, В.Ю. Полищук^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Институт мониторинга климатических и экологических систем (г. Томск, Россия)

Работа выполнена в рамках гранта по Постановлению Правительства РФ № 220 от 09 апреля 2010 г. по договору с Министерством образования и науки РФ № 14.B25.31.0001 от 24 июня 2013 г. (BIO-GEO-CLIM) и в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (соглашение № 14.B37.21.0184 от 23 июля 2012 г.), а также при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-05-90833-мол_рф_нр «Прогнозирование динамики термокарстовых озёр в зоне многолетней мерзлоты на основе космических снимков и математического моделирования»).

Вследствие высокой степени заболоченности и труднодоступности территории многолетней мерзлоты изучение термокарстовых процессов в зоне многолетней мерзлоты в связи с глобальными климатическими изменениями проводится с применением данных дистанционного зондирования поверхности Земли. При этом в качестве наиболее пригодных геоморфологических индикаторов изменений термокарстовых процессов используются хорошо дешифрируемые на космических снимках термокарстовые озёра. На основе установленных в ходе исследования свойств полей термокарстовых озёр сформулированы основные положения, определяющие существенные свойства модели пространственно-временной структуры полей термокарстовых озёр. В результате получена модель в виде совокупности окружностей со случайными радиусами и расположением, статистические свойства которой определены по космоснимкам. Проведено прогнозирование динамики полей термокарстовых озёр с использованием разработанной модели на основе компьютерного эксперимента в соответствии со сценарием до 2030 г.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота; дистанционное зондирование; математическое моделирование.

Введение

Известно [1], что мерзлота подвержена потеплению климата. С целью разработки мероприятий по преодолению негативных последствий потепления климата на территории мерзлоты, где сосредоточен нефтедобывающий комплекс России, требуется разработать вопросы прогнозирования динамики термокарстовых

процессов. Для формирования прогнозных оценок необходима разработка математической модели динамики термокарстовых процессов с учетом воздействия потепления климата. Данная разработка требует проведения исследования динамики термокарстовых процессов.

Изучение термокарстовых процессов в зоне многолетней мерзлоты в связи с глобальными климатическими изменениями, несомненно, является актуальной проблемой, решение которой вследствие высокой степени заболоченности и труднодоступности территории многолетней мерзлоты проводится с применением данных дистанционного зондирования (ДДЗ) поверхности Земли. При этом в качестве наиболее пригодных геоморфологических индикаторов изменений термокарстовых процессов используются хорошо дешифрируемые на космических снимках термокарстовые озёра, образующиеся в результате просадки земной поверхности из-за протаивания ископаемого льда и мерзлых пород [2–8].

Согласно [9, 10], характерные для севера Западной Сибири бугристые болота под влиянием термокарста стремительно разрушаются и превращаются в термокарстовые озера, которые в дальнейшем, сбросив свои воды в другой водоем, превращаются в хасыреи (котловины спущенных озер). В арктических районах Западной Сибири хасыреи могут занимать до 40–50% площади водной поверхности озер [11].

Как отмечено в [12], до недавнего времени ландшафт мерзлых бугристых болот находился в достаточно стабильном состоянии. Наблюдалась своеобразная «пульсация» поверхности, обусловленная взаимными переходами элементов ландшафта. Общую стратегию этого цикла превращений можно выразить в виде следующей последовательности: мерзлый бугор мог растаять и через серию мочажин возрастающей обводненности превратиться в термокарстовое озеро; озеро, сбросив свои воды в другой водоем, могло превратиться в спущенное озеро – хасырей; в днище опорожненной озерной котловины обычно начиналось мерзлотное пучение, приводящее к восстановлению мерзлых бугров [12].

Целью данной статьи является изложение вопросов разработки модели полей термокарстовых озер на основе результатов дистанционных исследований изменений термокарстовых процессов в ландшафтах мерзлых болот Сибири, предназначенной для прогнозирования динамики площадей термокарстовых озер.

Методические вопросы исследования динамики термокарстовых процессов

Для исследования термокарстовых ландшафтов мерзлых болот и особенностей растительного покрова необходимо иметь космические снимки за многолетний период времени. В настоящее время этому условию удовлетворяют космические снимки с космических аппаратов Landsat с более чем 35-летним архивом спутниковых данных. Следовательно, данные дистанционного зондирования открывают перспективные возможности для мониторинга изменения состояния термокарстовых озер и особенно для получения количественных параметров динамики площадей их водной поверхности на территории мерзлоты Западной Сибири, это подтверждается опытом использования ДДЗ для мониторинга состояния разных компонент окружающей среды, например [13].

Рассмотрим далее общую характеристику средств ДДЗ применительно к проведению исследований термокарстовых ландшафтов. Технические характеристики сканеров спутниковых систем Landsat приведены в [14]. Первые снимки Landsat

стали доступны с 1972 г. [14]. Основной массив снимков с первых трех спутников Landsat получен многозональной сканирующей системой MSS (Multispectral Scanner), дающей изображение полосы шириной 185 км в четырех спектральных зонах видимой и ближней инфракрасной части спектра с разрешением 80 м. С 1982 г. стали доступны снимки со спутника Landsat-4 с многозональной сканирующей системой TM (Thematic Mapper), работающей в семи спектральных диапазонах: видимой, ближней, средней и тепловой инфракрасных частей спектра. Разрешение в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах составляет 30 м, а в тепловом инфракрасном — 120 м. Съемка земной поверхности производится со спутника Landsat-5 с периодичностью в 16 сут.

С 1999 г. наиболее современные приборы ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) на спутнике Landsat-7 производят съемку в 8 спектральных каналах в диапазоне 0,4–13 мкм. Пространственное разрешение снимков в видимых и инфракрасных каналах составляет 30 м, в панхроматическом канале — 15 м, разрешение термального канала — 60 м. Основным преимуществом прибора ETM+ является наличие панхроматического канала с высоким разрешением 15 м, что обеспечивает возможность повышать достоверность распознавания термокарстовых озер.

В последние годы все большее использование получают всепогодные (не зависящие от облачности) радиолокационные спутники ERS-2 и ENVISAT [15–17] с синтезированной антенной, проводящие съемку поверхности Земли в радиодиапазоне с длиной волны 5,6 см. Снимки с радиолокационных спутников ERS-2 стали доступны с 1995 г., а ENVISAT — с 2002 г. [14]. Снимки ERS-2 с 2005 г. до середины 2011 г. на территории России принимались только наземной станцией центра ДЗЗ Югорского научно-исследовательского института информационных технологий (ЮНИИ ИТ) в г. Ханты-Мансийске.

К используемым ДЗЗ высокого разрешения относятся космические снимки со спутников Quick Bird. Снимки со спутника Quick Bird стали доступны с 2001 г. [14]. Основным преимуществом снимков со спутника Quick Bird является очень высокое пространственное разрешение, которое в панхроматическом канале составляет 61 см, в мультиспектральном — 2,44 м при полосе обзора около 16,5 км. Обычно данные сверхвысокого разрешения применяются для эпизодического мониторинга небольших территорий с высокой пространственной детальностью, а также для проведения локальных исследований. Основным фактором, сдерживающим широкое и регулярное использование спутниковых данных сверхвысокого разрешения, является их высокая стоимость, поэтому в настоящее время эти снимки не имеют столь широкого применения, как другие виды данных дистанционного зондирования.

Для исследования динамики термокарстовых процессов и растительного покрова на территории мерзлоты используются разновременные снимки, при обработке которых используются либо раздельная обработка снимков (снимки анализируются отдельно и затем сравниваются между собой), либо совместная обработка совокупности разновременных снимков, которые геометрически совмещаются и обрабатываются вместе, подобно многозональному снимку [13, 17].

При использовании ДЗЗ большую роль играет компьютерная обработка космических снимков. В настоящее время обработка и дешифрирование снимков

осуществляются с помощью пакетов прикладных программ, наиболее распространенными из которых являются ENVI, ERDAS Imagine, ArcGis, позволяющие проводить комплекс основных операций по обработке снимков.

Классификация термокарстовых озер на космических снимках Landsat проводится с помощью алгоритма Binary encoding classification в программном обеспечении ENVI 4.4, по результатам которой осуществляется векторизация границ термокарстовых озер с автоматическим определением площадей озер. Для классификации растительного покрова используются стандартные программные средства геоинформационных систем ENVI, ERDAS Imagine, осуществляющие автоматическую классификацию или классификацию с обучением. Предварительно снимки должны быть радиометрически и геометрически скорректированы для исключения ложных изменений, вызванных различиями в условиях съемки, разносезонностью снимков и т.п. Для классификации объектов по разновременным снимкам используют алгоритмы классификации как с обучением, так и без обучения. Один из примеров такой обработки снимков с целью выявления изменений береговых границ озер приведен в работе [18].

Результаты исследований точности дистанционного измерения площадей озер рассмотрены в [19], где показано, что для озер с площадью 10 га и более средняя относительная погрешность измерения площадей озер на космических снимках Landsat не превышает 3,5%.

Измерения площадей озер на космических снимках LandSat на территории Западной Сибири [8, 9, 11] проводились с использованием стандартных средств геоинформационной системы ENVI 4.4. На каждом из тестовых участков определялось от нескольких сотен до нескольких тысяч термокарстовых озер различных размеров. Результаты измерения накапливались в базе данных по площадям термокарстовых озер Западной Сибири на основе космических снимков, созданной в Центре дистанционного зондирования Земли ЮНИИ ИТ.

Разработка математической модели динамики термокарстовых процессов на основе экспериментальных данных

Приведем результаты исследования статистического распределения термокарстовых озёр по их площадям на основе данных, полученных для отдельных тестовых участков – участков, на которых выделялось от нескольких сотен до нескольких тысяч термокарстовых озер. В ходе исследования выделены 30 тестовых участков.

Как показало проведенное в работе [20] исследование, общим для всех тестовых участков является экспоненциальный характер закона распределения озер по площадям. Учитывая, что закон распределения термокарстовых озер по площадям имеет вид показательного закона распределения, для удобства моделирования выберем однопараметрическое показательное распределение

$$y = \lambda \cdot e^{-\lambda s},$$

где λ – параметр распределения.

Известно, что математическое ожидание случайной величины, подчиняющейся этому закону распределения, равно [21]:

$$M(s) = \frac{1}{\lambda}.$$

Используем в качестве оценки математического ожидания $M(s)$ величину средней площади озёр, определяемую по экспериментальным данным в виде

$$S_{\text{ср}} = \frac{1}{n} S_i; i = \overline{1, n}.$$

Параметр λ может быть определен на основе экспериментальных данных:

$$\lambda = \frac{1}{S_{\text{ср}}}.$$

На основе вышеизложенного сформулируем основные положения, определяющие существенные свойства модели пространственно-временной структуры полей термокарстовых озёр:

1) формы береговых границ озёр могут быть представлены уравнением окружности с координатами центров x_i, y_i и площадью S_i (i – номер озера);

2) пространственные изменения координат центров окружностей и их площадей статистически независимы;

3) случайное распределение каждой из координат центров окружностей $x_i, y_i, i = \overline{1, n}$ определяется законом равномерной плотности;

4) случайное распределение числа окружностей по их площадям определяется показательным законом распределения в виде (1) с показателем λ ;

5) временные изменения статистических свойств поля термокарстовых озёр определяются зависимостью показателя коэффициента λ от времени t в виде уравнения линейного тренда $y(t) = \lambda \cdot t + b$;

6) зависимость статистических свойств поля термокарстовых озёр от температуры и осадков описывается уравнением регрессии вида

$$\lambda = c_0 + c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3,$$

где x_1 – среднегодовая температура воздуха; x_2 – уровень осадков; x_3 – время и определяется функцией

$$\lambda = f(T, P, t),$$

где T (температура) и P (уровень осадков) являются функциями времени $T(t)$ и $P(t)$.

С учетом перечисленных выше требований модель поля термокарстовых озёр будет представлять собой совокупность случайных окружностей [20], статистические свойства которой будут соответствовать экспериментально определенным свойствам реальных полей термокарстовых озёр. По закону равномерной плотности должны быть распределены центры окружностей [20]. Так как термокарстовые озёра распределены по их площадям в соответствии с экспоненциальным законом распределения, то и распределение площадей окружностей в модели также будет подчиняться экспоненциальному закону. С учетом вышесказанного моделирование будет происходить с использованием тройки чисел, а именно значения координат центров и площади x, y, s .

В качестве основных элементов описания модели должны быть определены характеристики, учитывающие форму озёр, параметры их случайного расположения на плоскости и распределения размеров озёр. В соответствии с вышеизложенным модель пространственной структуры, предложенная в нашей работе [20], представляет собой совокупность окружностей, каждая из которых имитирует отдельное термокарстовое озеро.

Результаты использования модели для прогнозирования динамики термокарстовых процессов

Проведено прогнозирование динамики полей термокарстовых озер с использованием разработанной модели на основе компьютерного эксперимента в соответствии со следующим сценарием: прогнозирование динамики полей термокарстовых озер на период 2010–2030 гг. по значениям линейных трендов изменения приземной температуры воздуха и количества осадков (рис. 1).

Предложенный сценарий предполагает использование данных по температуре воздуха из архива реанализа ECMWF ERA Interim [22] и данных об изменениях количества осадков из архива APHRODITE JMA [23]. Методика прогнозирования с применением системы имитационного моделирования полей термокарстовых озер подробно описана в [20].

Прогноз составлен для периода с 2010 по 2030 г. Значения годовой суммы осадков, использованные в прогнозировании, получены путем экстраполяции на основе уравнения линейного тренда [20]. Значения среднегодовой температуры воздуха, примененные в прогнозировании, получены путем экстраполяции с использованием уравнения линейного тренда [20], по аналогии с прогнозом температуры ГГО им. Воейкова, для всей территории России [24].

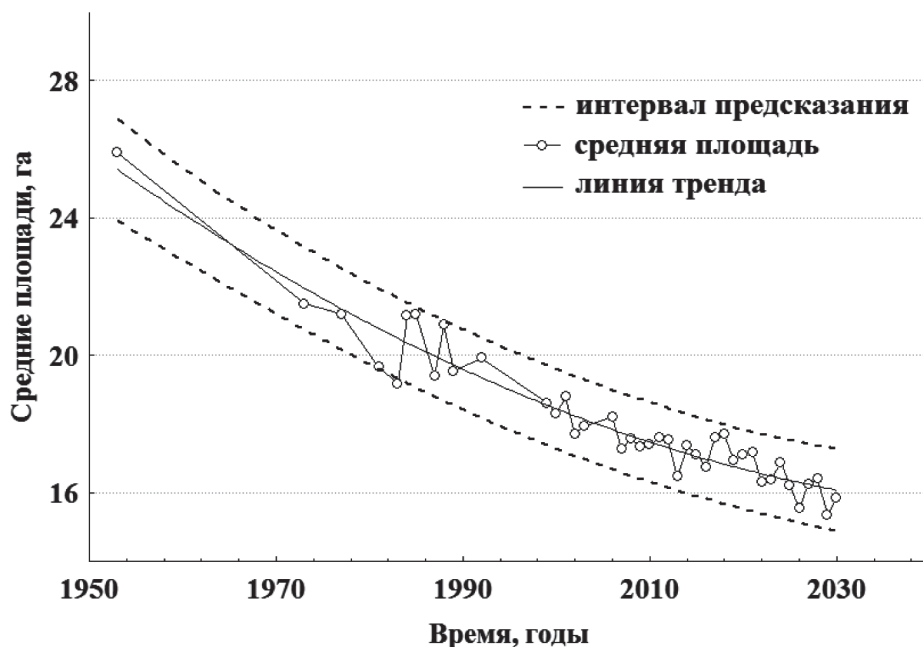


Рис. 1. Прогнозные оценки средних площадей термокарстовых озер

Из рис. 1 видно, что если в течение последующих четырех десятилетий тенденции роста среднегодовой температуры воздуха будут сохраняться, то следует ожидать сокращения площадей термокарстовых озер. Расчет показывает, что сокращение площадей озер к 2030 г. в среднем может составить 9,6% по сравнению с 2010 г.

Заключение

В отчете рассмотрены вопросы разработки модели динамики термокарстовых озер на основе результатов дистанционного исследования пространственно-временных свойств полей термокарстовых озер, пригодной для прогнозирования динамики термокарстовых процессов на территории многолетней мерзлоты. В результате была получена модель в виде совокупности окружностей со случайными радиусами и расположением, статистические свойства которой определены по космоснимкам. Приведен пример прогнозирования динамики полей термокарстовых озер до 2030 г. с использованием разработанной модели на основе компьютерного эксперимента.

Литература

- [1] Анисимов О., Лавров С. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК РФ // Технологии ТЭК. 2004. № 3. С. 78–83.
- [2] Полищук Ю.М., Токарева О.С. Вопросы мониторинга изменений состояния многолетнемерзлых пород в условиях глобального потепления с использованием космических снимков // Вестник ЮГУ. 2006. № 3. С. 87–90.
- [3] Гудилин И.С., Комаров И.С. Применение аэрометодов при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях. М. : Недра, 1978. 319 с.
- [4] Мельников Е.С., Вейсман Л.И., Кришук Л.Н. Ландшафтные индикаторы инженерно-геокриологических условий севера Западной Сибири и их дешифровочные признаки. М. : Недра, 1974. 132 с.
- [5] Некрасов И.А., Петропавловская М.С. Опыт применения космических снимков для геокриологического картирования // Исследования Земли из космоса. 1983. № 2. С. 14–20.
- [6] Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes // Science. 2005. Vol. 308, № 3. P. 14.
- [7] Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // Journal of Geophysical research. 2006. Vol. 111. G04002. doi: 10.1029/2005JG000150.
- [8] Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Изучение изменений термокарстовых озёр в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исследование Земли из Космоса. 2009. № 4. С. 88–96.
- [9] Кирпотин С.Н., Воробьев С.Н., Хмыз В.Ф. и др. Строение и динамика растительного покрова плоскобугристых болот Надым-Пурского междуречья Западно-Сибирской равнины // Ботанический журнал. 1995. Т. 80, № 8. С. 29–39.
- [10] Kirpotin S.N., Polishchuk Yu. M., Bryksina N.A. Dynamics of thermokarst lakes areas in continuous and discontinuous cryolithozones of Western Siberia under global warming // Vestnik of Tomsk State University. 2008. Vol. 311. P. 185–189.
- [11] Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. и др. Нарушение эндогенной циклической сукцессии развития плоскобугристого болотного комплекса в результате резкого усиления термокарста в субарктике Сибири в связи с глобальным потеплением климата (по данным наземного и космического мониторинга) // Рациональное использование природных ресурсов и комплексный экологический мониторинг окружающей среды : материалы междунар. школы-семинара / под ред. С.Н. Кирпотина. Томск : Изд-во Том. политех. ун-та. 2006. С. 411–420.
- [12] Кирпотин С.И. Западная Сибирь – уникальный болотный регион и ее роль в регулировании глобального климата // Актуальные проблемы экологии и природопользования Сибири в глобальном контексте : сб. ст. / под ред. С.Н. Кирпотина. Томск : Изд-во НТЛ, 2006. С. 22–42.
- [13] Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И. Аэрокосмические исследования динамики географических явлений. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1991. 205 с.
- [14] Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М. : Изд-во А и Б, 1997. 296 с.
- [15] Smirnova A., Rusanova and Smirnova N. Processing and Interpretation of Remotely Sensed Data based on GIS for Study of Exogenic Geological Processes in the North–Eastern part of Timan–

- Pechorian Petroleum Province // Proceedings of III International Conference “Remote Sensing of Natural Environment”. Minsk, 2006. P. 166–168.
- [16] Kopylov V., Bryksina N., Polishchuk V., Polishchuk Y. Study of Thermokarst lakes areas changes in West-Siberian permafrost using ERS-2/SAR // Intern. Conf. “ESA Living Planet Symposium”. Bergen, Norway. June 28 – July 2. 2010. URL: <http://www.congrex.nl/10a04> [CD-presentation]
- [17] Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований : учеб. М. : Академия, 2004. 336 с.
- [18] Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изучение динамики термокарстовых озер России // Геоинформатика. 2009. № 1. С. 44–51.
- [19] Брыксина Н.А. Научно-методические основы применения данных дистанционного зондирования при исследовании термокарстовых ландшафтов Западно-Сибирской равнины // Томск : ТГУ. 2011. 192 с.
- [20] Полищук В.Ю. Математическое моделирование динамики термокарстовых процессов на территории многолетней мерзлоты Западной Сибири. Барнаул : АлтГУ, 2012. 155 с.
- [21] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М. : Гос. изд. физ.-мат. лит., 1962. 562 с.
- [22] Dee D.P. et. al. The ERA – Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137. P. 553–597.
- [23] APHRODITE JMA. URL: http://www.chikyu.ac.jp/precip/data/APHRO_V1003R1_readme.txt
- [24] Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010 – 2015 гг. и их влияние на отрасли экономики России. М. : Росгидромет, 2005. 30 с.

Сведения об авторах

Полищук Владимир Юрьевич – младший научный сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, старший научный сотрудник Томского государственного университета (г. Томск, Россия). E-mail: liquid_metal@mail.ru

Кирпотин Сергей Николаевич – проректор по международным связям Томского государственного университета, доктор биологических наук, доцент; профессор кафедры ботаники Биологического института Томского государственного университета (г. Томск, Россия). E-mail: kirp@mail.tsu.ru

S.N. Kirpotin¹, V.Y. Polishchuk^{1,2}

¹National Research Tomsk State University (Tomsk)

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS (Tomsk)

FORECASTING DYNAMICS OF THERMOKARST LAKES IN PERMAFROST BASED ON SPACE IMAGES AND MATHEMATICAL MODELING

The paper is devoted to modeling and prediction dynamics of thermokarst lake fields in permafrost. Because of the high extent of waterlogging and difficult areas of permafrost study thermokarst processes in permafrost due to global climate change is carried out using of remote sensing data (RSD) of the surface of the Earth. In this case as the most suitable geomorphic indicators of changes in thermokarst processes which well decoded on satellite images are thermokarst lakes, formed as a result the earth's surface subsidence due to thawing permafrost. To study thermokarst landscapes frozen bogs and vegetation features necessary to have space images for a multiyear period of time. Currently, this condition is satisfied with satellite images from Landsat satellites with more than 40 years of satellite data archives. When using remote sensing plays an important role computer processing of satellite images. Currently, processing and decoding of images is carried out using application packages, the most common of which are ENVI, ERDAS Imagine, ArcGis, allowing to carry out a set of basic image processing operations. During the research allocated 30 test sites. On each of the test sites was determined from several hundred to several thousand thermokarst lakes of various sizes. Found that common to all test sites is the exponential nature of the distribution law of lakes by sizes. The

measurement results stored in the database on the areas of thermokarst lakes in Western Siberia on the basis of satellite images. On the basis of identified during the investigation of the properties of fields thermokarst lakes formulated the basic provisions determining the essential properties of the model spatiotemporal structure of thermokarst lakes fields. Thus forms of coastal boundaries of lakes may be represented by the circles. The spatial changes coordinates of the centers of the circles and squares are statistically independent. Random distribution of each of the coordinates of the centers of the circles defined by the law of uniform density. Random distribution of the areas of circles determined by exponential law of distribution. Dependence of the statistical properties of the field of thermokarst lakes on temperature and precipitation is described by the regression equation. As major elements of the model description defined characteristics, taking into account the shape of the lake, the parameters of the random distribution of the plane and a random distribution of lakes size. The result was a model as a set of circles with random radii and locations, statistical properties of which are determined on base of space images. Carried out prediction of field dynamics of thermokarst lakes using the developed model based on computer simulation in accordance with the scenario until 2030 year.

Key words: Permafrost, remote sensing, mathematical modeling.

Reference

- [1] Anisimov O., Lavrov S. Global'noe poteplenie i tayanie vечноy merzloty: otsenka riskov dlya proizvodstvennykh ob"ektov TEK RF // *Tekhnologii TEK*. 2004. No. 3. P. 78–83.
- [2] Polishchuk Yu.M., Tokareva O.S. Voprosy monitoringa izmeneniy sostoyaniya mnogoletnemerzlykh porod v usloviyakh global'nogo potepleniya s ispol'zovaniem kosmicheskikh snimkov // *Vestnik YuGU*. 2006. No. 3. P. 87–90.
- [3] Gudilin I.S., Komarov I.S. Primenenie aerometodov pri inzhenerno-geologicheskikh i gidrogeologicheskikh issledovaniyakh. M.: Nedra, 1978. 319 p.
- [4] Mel'nikov E.S., Veysman L.I., Kritsuk L.N. Landshaftnye indikatory inzhenerno-geokriologicheskikh usloviy severa Zapadnoy Sibiri i ikh deshifrovochnye priznaki. M.: Nedra, 1974. 132 p.
- [5] Nekrasov I.A., Petropavlovskaya M.S. Opyt primeneniya kosmicheskikh snimkov dlya geokriologicheskogo kartirovaniya // *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. 1983. No. 2. P. 14–20.
- [6] Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes. *Science*. 2005. Vol. 308, No. 3. P. 14.
- [7] Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // *Journal of Geophysical research*. 2006. Vol. 111. G04002. doi: 10.1029/2005JG000150.
- [8] Dneprovskaya V.P., Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. Izuchenie izmeneniy termokarstovykh ozer v zone preryvistogo rasprostraneniya vечноy merzloty Zapadnoy Sibiri na osnove kosmicheskikh snimkov // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2009. No. 4. P. 88–96.
- [9] Kirpotin S.N., Vorob'ev S.N., Khmyz V.F. i dr. Stroenie i dinamika rastitel'nogo pokrova ploskobugrystykh bolot Nadym-Purskogo mezhdurech'ya Zapadno-Sibirskoy ravniny // *Botanicheskiy zhurnal*. 1995. T. 80, No. 8. P. 29–39.
- [10] Kirpotin S.N., Polishchuk Yu. M., Bryksina N.A. Dynamics of thermokarst lakes areas in continuous and discontinuous cryolithozones of Western Siberia under global warming. *Vestnik of Tomsk State University*. 2008. Vol. 311. P. 185–189.
- [11] Kirpotin S.N., Polishchuk Yu.M., Bryksina N.A. i dr. Narushenie endogennoy tsiklicheskoj suksessii razvitiya ploskobugristogo bolotnogo kompleksa v rezul'tate rezkogo usileniya termokarsta v subarktike Sibiri v svyazi s global'nym potepleniem klimata (po dannym nazemnogo i kosmicheskogo monitoringa) // *Ratsional'noe ispol'zovanie prirodnnykh resursov i kompleksnyy ekologicheskii monitoring okruzhayushchey sredy*: materialy mezhdunar. shkoly-seminara. pod red. S.N. Kirpotina. Tomsk: Izd-vo Tom. politekh. un-ta. 2006. P. 411–420.
- [12] Kirpotin S.I. Zapadnaya Sibir' — unikal'nyy bolotnyy region i ee rol' v regulirovanii global'nogo klimata // *Aktual'nye problemy ekologii i prirodnopol'zovaniya Sibiri v global'nom kontekste*: sb. st.pod. red. S.N. Kirpotina. Tomsk: Izd-vo HTL, 2006. P. 22–42.

- [13] Knizhnikov Yu.F., Kravtsova V.I. Aerokosmicheskie issledovaniya dinamiki geograficheskikh yavleniy. M. : Izd-vo Mosk. un-ta, 1991. 205 p.
- [14] Garbuk S.V., Gershenzon V.E. Kosmicheskie sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli. M. : Izd-vo A i B, 1997. 296 s.
- [15] Smirnova A., Rusanova and Smirnova N. Processing and Interpretation of Remotely Sensed Data based on GIS for Study of Exogenic Geological Processes in the North–Eastern part of Timan–Pechorian Petroleum Province // *Proceedings of III International Conference “Remote Sensing of Natural Environment”*. Minsk, 2006. P. 166–168.
- [16] Kopylov V., Bryksina N., Polishchuk V., Polishchuk Y. Study of Thermokarst lakes areas changes in West-Siberian permafrost using ERS–2/SAR. Intern. Conf. “ESA Living Planet Symposium”. Bergen, Norway. June 28 – July 2. 2010. URL: <http://www.congrex.nl/10a04> [CD–presentation]
- [17] Knizhnikov Yu.F., Kravtsova V.I., Tutubalina O.V. Aerokosmicheskie metody geograficheskikh issledovaniy : ucheb. M. : Akademiya, 2004. 336 p.
- [18] Kravtsova V.I., Bystrova A.G. Izuchenie dinamiki termokarstovykh ozer Rossii // *Geoinformatika*. 2009. No. 1. P. 44–51.
- [19] Bryksina N.A. Nauchno-metodicheskie osnovy primeneniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya pri issledovanii termokarstovykh landshaftov Zapadno-Sibirskoy ravniny. Tomsk : TGU. 2011. 192 p.
- [20] Polishchuk V.Yu. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki termokarstovykh protsessov na territorii mnogoletney merzloty Zapadnoy Sibiri. Barnaul : AltGU, 2012. 155 p.
- [21] Venttsel’ E.S. Teoriya veroyatnostey. M. : Gos. izd. fiz.-mat. lit., 1962. 562 p.
- [22] Dee D.P. et. al. The ERA – Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. Vol. 137. P. 553–597.
- [23] APHRODITE JMA. URL: http://www.chikyu.ac.jp/precip/data/APHRO_V1003R1_readme.txt
- [24] Strategicheskii prognoz izmeneniy klimata rossiyskoy federatsii na period do 2010 – 2015 gg. i ikh vliyaniye na otrasli ekonomiki Rossii. M. : Rosgidromet, 2005. 30 p.