УДК 551.345:528.88

ЗОНЫ АКТИВНОГО ТЕРМОКАРСТА НА ТЕРРИТОРИИ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ И ИХ ВЫЯВЛЕНИЕ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Полищук Юрий Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Центра дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий», Россия, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151; главный научный сотрудник научно-исследовательского информационного центра ФГБУН «Институт химии нефти СО РАН», Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Богданов Александр Николаевич,
главный специалист Центра дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий», Россия, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151. E-mail: bogdanovan@uriit.ru

Актуальность работы *обусловлена отсутствием методологии выявления и картографирования зон активных термокарстовых процессов на территории многолетней мерзлоты на основе космических снимков с использованием геоинформационных технологий и необходимостью ее разработки применительно к оценке накопления метана в термокарстовых озерах, являющихся наиболее активными источниками эмиссии метана в атмосферу в арктических и субарктических районах в условиях глобального потепления последних десятилетий.*

Цель работы*: разработка методических вопросов выявления областей распространения термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты и картографического отображения их границ на основе данных дистанционного зондирования и средств геоинформационных систем.*

Методы исследования*: дистанционные методы исследования пространственной структуры полей термокарстовых озер, включая малоизученные озера небольших размеров, с использованием спутниковых снимков среднего и высокого пространственного разрешения; методы геоинформационных систем для пространственного и статистического анализа спутниковых изображений полей термокарстовых озер в мерзлотных ландшафтах озерно-термокарстовых равнин.*

Результаты*. Разработаны методические вопросы и описана процедура выявления зон активного термокарста как областей распространения термокарстовых озер в мерзлотных ландшафтах и определения границ этих зон по космическим снимкам Landsat-8 с использованием снимков высокого разрешения Канопус-В. Сформированы коллекции снимков Landsat-8 и Канопус-В, полученных в летние месяцы 2013–2014 гг. На основе разработанной методологии с использованием средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3 определены границы и построена карта зон активного термокарста на территории прерывистой криолитозоны Западной Сибири.*

Ключевые слова:
Многолетняя мерзлота, глобальное потепление, термокарстовые озера, геоинформационные системы, спутниковые снимки.

Введение

Глобальное потепление климата, наиболее явно проявляющееся в последние десятилетия в северных широтах планеты, ускоряет деградацию многолетней мерзлоты. Это вызывает увеличение глубины сезонного протаивания почвы, что сопровождается снижением прочности многолетнемёрзлых грунтов и нарушением объектов инфраструктуры. Более того, мерзлота, являясь хранилищем законсервированного углерода в обширных мерзлых торфяных болотах на северных территориях Евразии и Северной Америки, при потеплении климата может стать источником возникновения еще большего потепления при высвобождении парниковых газов [1]. Углекислый газ и метан являются одними из наиболее сильных парниковых газов. Принято считать, что углекислый газ обеспечивает более половины вклада в парниковый эффект. Особую тревогу вызывает возможный рост эмиссии метана под влиянием климатических изменений, который, по данным [2], несмотря на значительно меньшую концентрацию в атмосфере, по величине прямого потенциала глобального потепления многократно превышает углекислый газ.

В качестве основных природных источников эмиссии метана на северных территориях рассматриваются болота и переувлажненные ландшафты, озерно-термокарстовые равнины, подводные метангидраты шельфовых морей и крупных водоемов в зоне многолетней мерзлоты и др. [3–6]. Согласно [7, 8], наиболее активным источником эмиссии метана в зоне мерзлоты Западной Сибири являются малые термокарстовые озера с площадью менее 0,05–0,1 га, что объясняется активной термокарстовой эрозией берегов при повышении температуры [5]. Из-за своих малых размеров такие озера, как правило, не учитываются в прогнозных оценках вклада метана в общий парниковый эффект.

В этих условиях получение обоснованных прогнозных оценок изменения вклада метана из малых озер в зоне вечной мерзлоты под действием климатических изменений является важной задачей, решение которой, согласно [9], предполагает использование экспериментальных данных об изменении численности и площадей озер. Получение таких данных для территории Западной Сибири без применения методов дистанционного зондирования поверхности Земли невозможно ввиду ее труднодоступности из-за высокой степени заболоченности.

В последнее время проведены многочисленные дистанционные исследования изменений термокарстовых озер в Сибири, на Аляске и в других северных регионах [6, 10–15]. В большинстве этих исследований использовались космические снимки среднего разрешения (30 м) Landsat, обеспечивающие многократное полное покрытие земного шара. Но на этих снимках малые озера не обнаруживаются. Поэтому необходимо использовать снимки высокого (1–10 м) и сверхвысокого (менее 1 м) разрешения. Однако эти снимки из-за малой полосы охвата территории обеспечивают сравнительно небольшое покрытие исследуемой территории, что затрудняет выбор ключевых (тестовых) участков для проведения дистанционных исследований, направленных на изучение изменений термокарстовых озер в условиях отмечаемой в [16] значительной неравномерности их пространственного распределения по территории многолетней мерзлоты. Поэтому актуальным является выявление на исследуемой территории зон наиболее активного развития термокарстовых процессов, в пределах границ которых могут быть выбраны тестовые участки для проведения исследований.

Под зоной активного термокарста (АТ) понимается область распространения термокарстовых озер различных размеров и возраста с многочисленными очагами развития термокарста в мерзлотных ландшафтах озерно-термокарстовых равнин [17]. Именно с этими зонами связаны большие геоэкологические риски [18] для территорий в зоне многолетней мерзлоты. В этих зонах наибольшую изменчивость проявляют озера малых размеров, которые в большом количестве возникают в условиях глобального потепления климата. Действительно, как показано в [14], численность вновь образующихся малых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири в последние три-четыре десятилетия почти в 20 раз превышает число исчезающих озер.

Однако методические вопросы определения зон активного термокарста в мерзлотных ландшафтах на основе использования спутниковых снимков не разработаны, что не позволяет создать геоинформационную технологию построения зон активного термокарста. В связи с изложенным целью настоящей работы явилась разработка методических вопросов выявления и картографирования зон активного термокарста на территориях многолетней мерзлоты на основе космических снимков.

Данные и объекты исследования

Исследования проводились на территории Западной Сибири, в зоне прерывистого распространения многолетней мерзлоты. Расположение этой зоны показано на рис. 1, где представлен фрагмент картосхемы геокриологичекого зонирования Западной Сибири.

В наших исследованиях, направленных на построение зон активного термокарста (АТ), использованы космические снимки Landsat-8 и Канопус-В. При составлении мозаики снимков для территории прерывистой криолитозоны Западной Сибири использовано 34 снимка Landsat-8, принятых в теплые месяцы 2013–2014 гг., 80 % из которых получены в июле-августе, когда на поверхности озер уже нет ледового покрова, затрудняющего автоматическое дешифрирование снимков. Для исследования погрешности определения границ зон активного термокарста, выявляемых на основе мозаики снимков Landsat-8, использованы 7 снимков высокого разрешения Канопус-В. Снимки Канопус-В для территории прерывистой криолитозоны получены за сравнительно короткий интервал времени (с 23 июня по 22 июля), т. е. приблизительно в те же теплые периоды 2013–2014 гг., что и снимки Landsat-8. Даты съемки Канопус-В на разных тестовых участках исследуемой территории в зоне прерывистой мерзлоты (рис. 1) приведены в табл. 1.

Таблица 1. *Характеристика тестовых участков и даты съемки снимков Канопус-В*

Table 1. *Characteristic of test sites and date of Kanopus-V recording images*

№ ТУ TS No.	Широта, град. Latitude, deg.	Долгота, град. Longitude, deg.	Дата Date	Площадь ТУ, км^2 TS area, km^2
1	65,70	67,30	30.06.2014	400
2	64,86	69,34	20.06.2014	380
3	66,25	72,45	22.07.2013	600
4	64,82	74,02	03.08.2014	300
5	65,82	77,02	23.06.2013	770
6	65,65	79,89	05.07.2013	480
7	65,15	82,36	18.07.2013	440

Выбор тестовых участков (ТУ) для проведения исследований производился в границах сцен космических снимков Канопус-В в местах активного термокарста [18], определяемых по наибольшему сгущению озер. Общая характеристика выбранных тестовых участков дана в табл. 1. Как видно на рис. 1, выбранные тестовые участки довольно равномерно распределены по территории исследований в зоне прерывистого распространения мерзлоты. Согласно [18], образование термокарстовых озер происходит под воздействием нескольких факторов, главными из которых являются наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород и равнинный характер территории. Поэтому большинство исследователей озерных термокарстовых равнин исходят из предположения о том, что в ра-

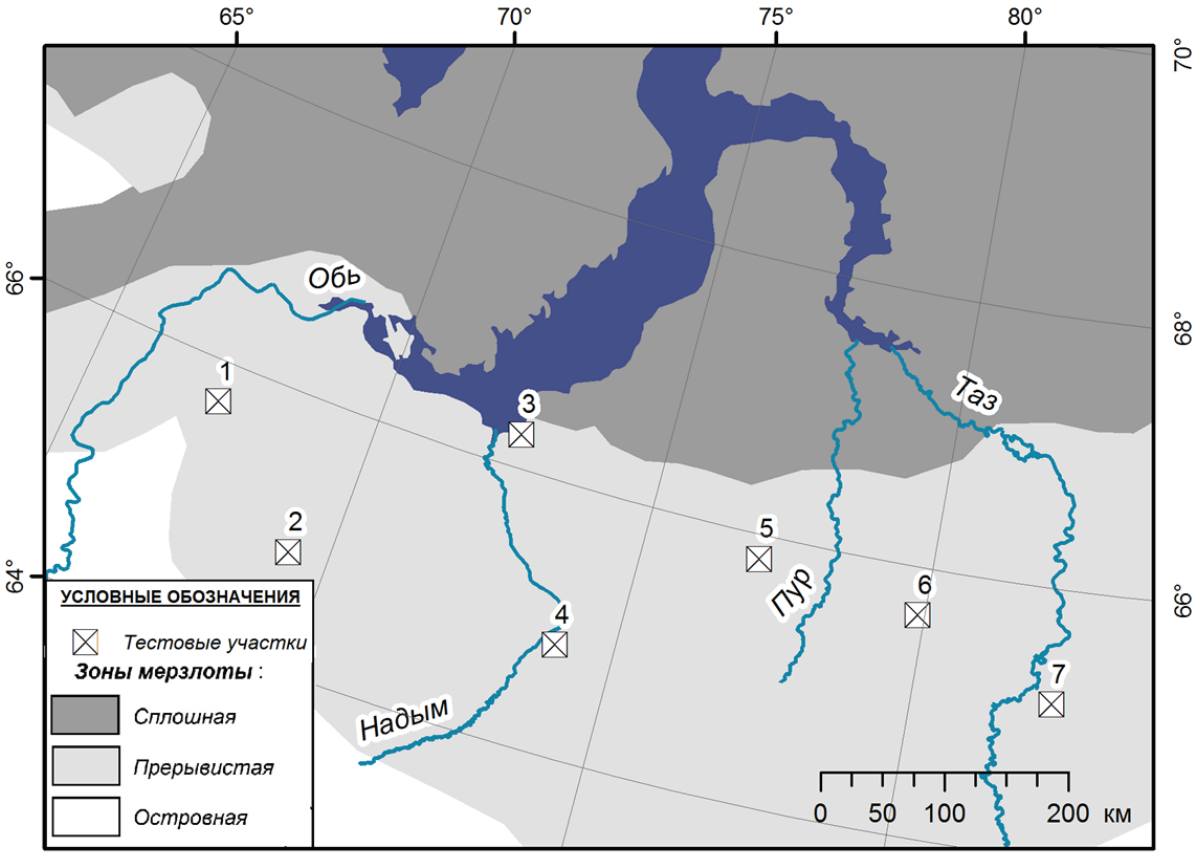


Рис. 1. *Картосхема геокриологического зонирования территории многолетней мерзлоты Западной Сибири с обозначенным расположением тестовых участков на снимках Канопус-В*

Fig. 1. *Schematic map of geocryological zoning of permafrost territory of Western Siberia with designated location of test sites in Kanopus-V images*

йонах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород криолитозоны распространены преимущественно озера термокарстового происхождения либо озера смешанного генезиса при значительном влиянии термокрастовых процессов. Так, в работах В.И. Кравцовой с соавторами [6, 19] на основе геоморфологического и климатического анализа вся криолитозона Западной Сибири отнесена к числу районов с повсеместным распространением термокарстовых озер. Поэтому в настоящей работе исследуемые озера рассматриваются как термокарстовые озера.

Обработка космических снимков проведена с использованием стандартных средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3. На каждом из тестовых участков определялось от нескольких сотен до десятков тысяч термокарстовых озер сравнительно небольших размеров. Для обеспечения приемлемой погрешности в определении площадей озер минимальный размер регистрируемых озер определялся как полигон, в границах которого располагаются 10 пикселей. При разрешении снимка Канопус-В, равном 2 м, площадь пикселя составляет 4 м^2. Определяя наименьшее по размеру озеро как полигон размером 10 пикселей, получим минимальную площадь озера 40 м^2. В связи с этим при формировании массивов данных со снимков Канопус-В для последующего анализа исключались озера с размерами менее 40 м^2.

Методические вопросы выявления зон активного термокарста

Общая схема процедуры определения границ зон активного термокарста. Определение границ зон АТ проводилось по снимкам Landsat-8, а снимки высокого разрешения Канопус-В использовались для уточнения границ этих зон на основе исследования погрешностей определения границ. Общая схема процедуры построения зон АТ дана на рис. 2.

Границы зон активного термокарста были определены как контуры, ограничивающие пространственные ассоциации (совокупности) озер, полученные путем объединения (агрегирования) близко расположенных друг к другу озер на снимках Landsat-8 (рис. 3). Эта процедура выполнялась с использованием инструмента пространственного анализа Aggregate Polygons в составе программного комплекса ArcGIS 10.3 [20].

На рис. 4 дана иллюстрация построения зоны АТ с использованием указанного инструмента. На фрагменте снимка Канопус-В показан результат

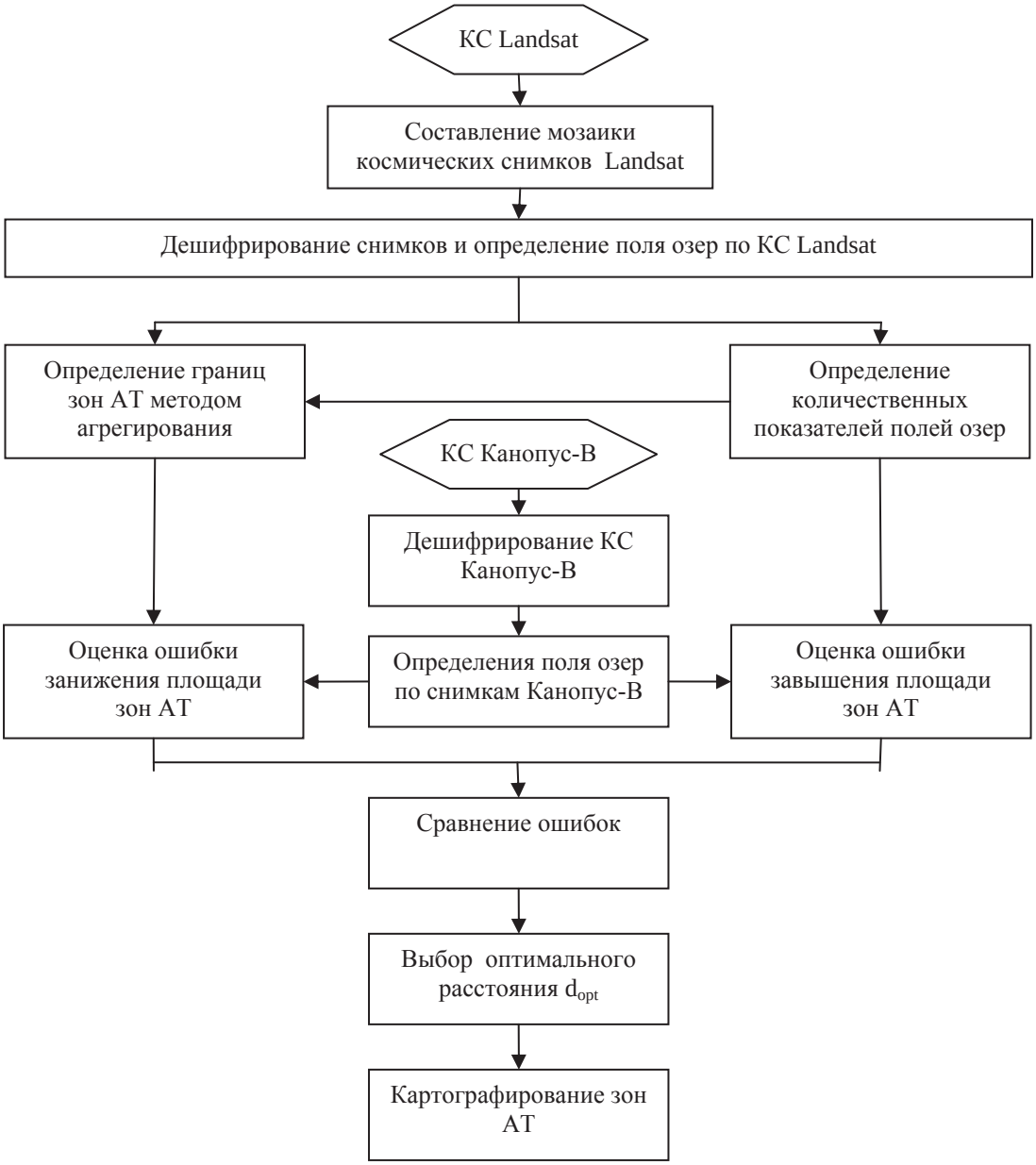


Рис. 2. *Процедура определения и картографирования зон активного термокарста на основе космических снимков*

Fig. 2. *Procedure for identifying and mapping zones of active thermokarst based on satellite images*

определения границ зон АТ, а сами зоны выделены сиреневым цветом.

Такой подход к определению зон АТ предполагает, что кроме термокарстовых озер сравнительно больших размеров, хорошо обнаруживаемых по космоснимкам Landsat (пространственное разрешение 30 м), на исследуемой территории также будут реально присутствовать и малые озера (с размерами менее 0,2–0,3 га), не различимые на снимках среднего разрешения Landsat, но которые будут хорошо видны на снимках высокого разрешения Канопус-В. Поэтому при автоматическом определении границ зон АТ по снимкам среднего разрешения будут возникать ошибки двух видов:

1. Занижение общей площади реальных зон активного термокарста из-за выбора слишком малого расстояния между озерами d показано на рис. 3. При этом риск занижения площади зоны АТ будет возникать в случаях, когда в зону АТ не будут включены малые озера, расположенные в удалении от крупных, т. е. оказавшиеся за пределами автоматически формируемых границ зоны АТ.
2. Завышение общей площади реальных зон активного термокарста из-за выбора слишком большого расстояния d при объединении крупных озер. Риск завышения площади зоны АТ будет возникать в случаях, если в зону активно-

го термокарста будут включены те участки территории, на которых отсутствуют озера (как проявления термокарста), т. е. на которых, по данным космосъемки более высокого пространственного разрешения, не обнаруживаются озера меньших размеров.

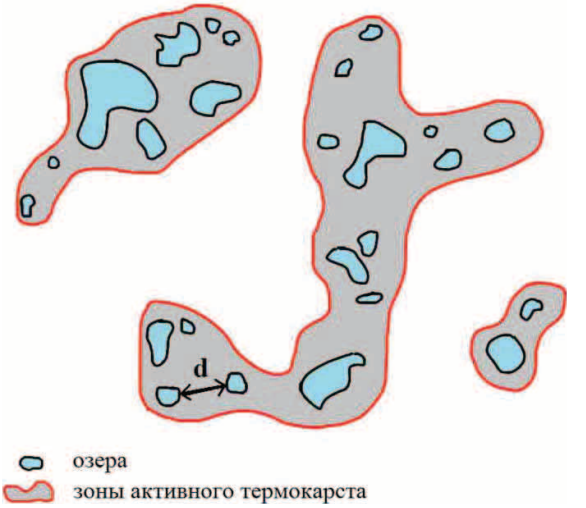


Рис. 3. *Формирование границ зон активного термокарста методом агрегирования озер*

Fig. 3. *Formation of the active thermokarst zones boundaries by aggregating lakes*

На рис. 5 представлен фрагмент снимка Канопус-В, на котором пятнами черного цвета показаны озера. Здесь отображены зоны АТ (выделены сиреневым цветом) и показаны штриховкой области завышения и занижения площади зон АТ. Каждому понятно, что размеры этих областей занижения и завышения, т. е. ошибки занижения и завышения площади зон АТ, зависят от расстояния между озерами d. При малых величинах этого расстояния возрастает ошибка занижения площади зон АТ, а ошибка завышения будет невелика. И наоборот, при увеличении расстояния d растет риск (ошибка) завышения, а ошибка занижения площади снижается. В связи с этим возникает важнейший вопрос: как найти величину расстояния d, при которой риски занижения и завышения площадей зон АТ при автоматизированном определении границ этих зон с помощью инструмента Aggregate polygons будут иметь приемлемые (минимальные) величины? Далее будем называть такую величину расстояния оптимальной и обозначим ее d_{opt}.

Нахождение оптимальной величины расстояния d_{opt} в общем случае представляет собой задачу оптимизации, которая в связи с отсутствием аналитического вида зависимостей рассматриваемых ошибок от расстояния d не может быть решена. Приближенное решение этой задачи возможно с использованием имитационного эксперимента, суть которого сводится к вычислению ошибок завышения и занижения площадей зон АТ по реальным спутниковым снимкам в зависимости от расстояния d и определению величины d_{opt} на основе анализа результатов эксперимента.

Эксперимент проводился с использованием снимков Landsat-8 и Канопус-В на семи тестовых участках в зоне прерывистого распространения мерзлоты Западной Сибири. Расположение этих участков представлено на рис 1, который демонстрирует достаточно равномерное распределение этих ТУ на исследуемой территории. На каждом из ТУ по снимкам Landsat с помощью инструмента Aggregate polygons определялись зоны АТ для 5 различных значений расстояния d. По снимкам Канопус-В на каждом ТУ создавались карты полей озер, на основе совмещения которых с контурами зон АТ, построенных по снимкам Landsat-8, были рассчитаны ошибки занижения и завышения суммарной площади зон АТ при разных величинах d. Приведем ниже описание процедур оценивания указанных ошибок занижения и завышения площадей.

Оценка ошибки занижения площади зон. Занижение истинной площади активного термокарста будет тем больше, чем меньшая величина d была выбрана при определении границ зон АТ. Ошиб-

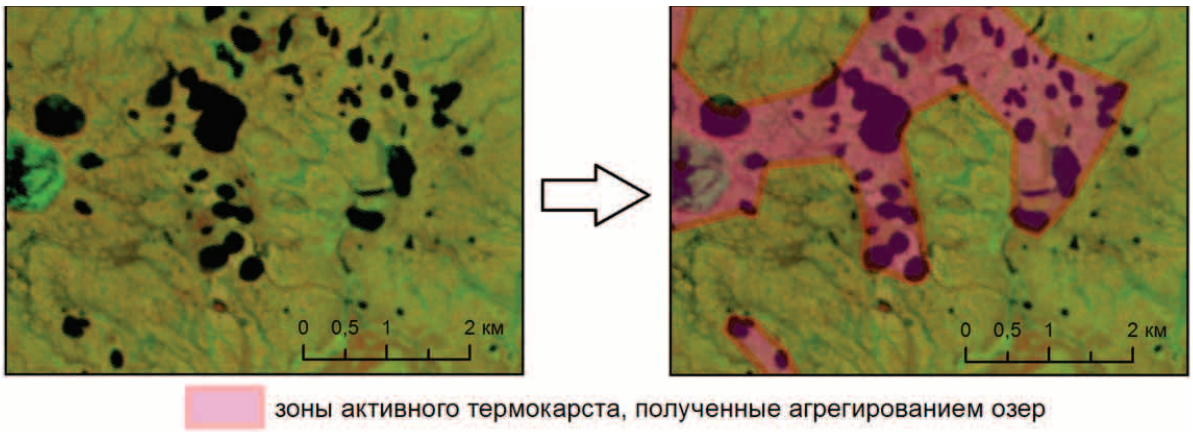


Рис. 4. *Фрагмент космического снимка Канопус-В (слева) и отображение на нем зон активного термокарста (справа)*

Fig. 4. *Fragment of Kanopus-V satellite image (on the left) and display of the zones of active thermokarst (on the right)*

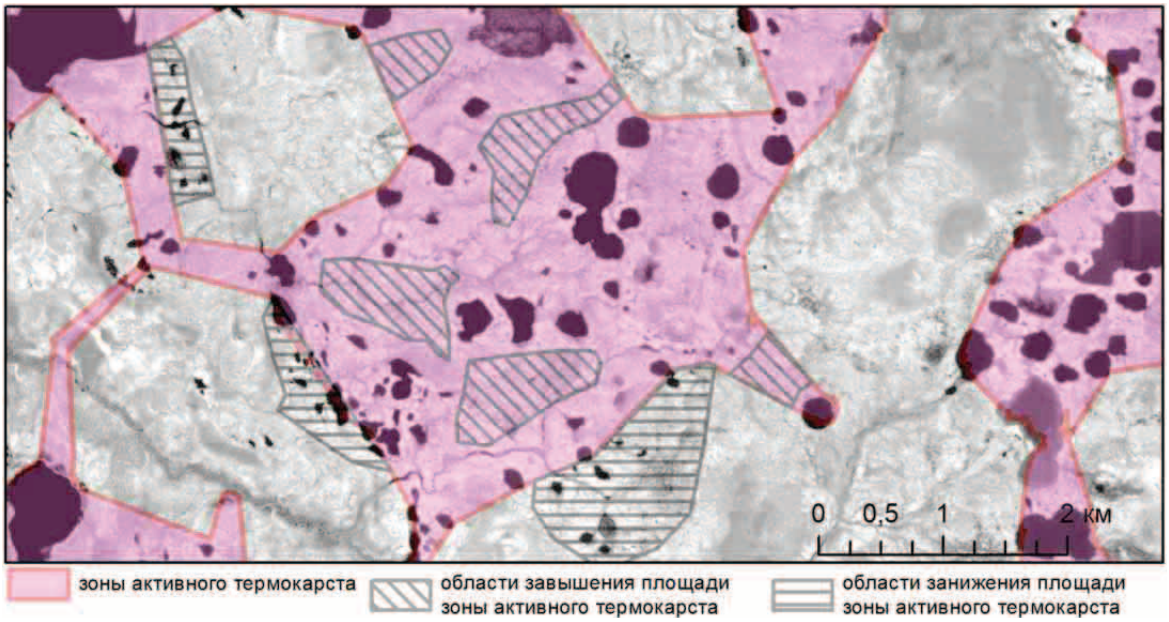


Рис. 5. *Фрагмент снимка Канопус-В с обозначенными озерами, зонами активного термокарста и областями завышения и занижения размеров зон*

Fig. 5. *Fragment of Kanopus-V image with designated lakes, zones of active thermokarst and the areas of overstatement and understatement of the zones sizes*

ка занижения общей (суммарной) площади зон АТ определялась как относительная величина суммарной площади озер, обнаруженных на снимках высокого разрешения Канопус-В, но не попавших в построенную зону активного термокарста в связи с тем, что эти озера не видны на снимках Landsat. Результаты расчета этой ошибки при задании различных значений d приведены в табл. 2.

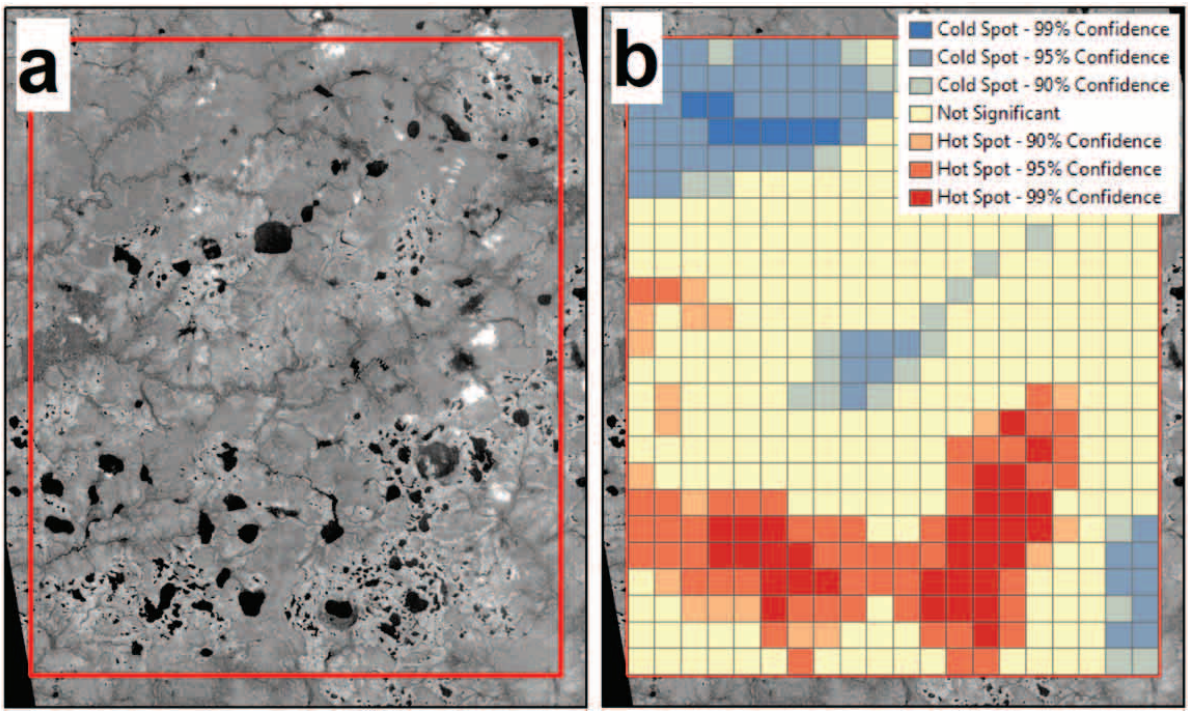
Таблица 2. *Ошибки занижения площади зон активного термокарста при разных величинах d*

Table 2. *Errors of understatement of the thermokarst-active zone area at different values of d*

Показатель/Index	ТУ TS	Расстояние d, м/Distance d, m				
		500	1000	2000	3000	5000
Относительная суммарная площадь озер, не попавших в границы зоны активного термокарста, % Relative total area of lakes which are not included in the area of the thermokarst-active zone, %	1	50,3	36,7	13,0	2,8	1,2
	2	65,3	54,7	13,4	9,4	3,3
	3	46,6	25,3	9,4	0,0	0,0
	4	46,4	25,1	9,8	6,4	2,1
	5	38,0	21,1	10,0	1,0	0,7
	6	34,8	15,5	7,3	4,3	0,3
	7	37,4	10,7	3,9	1,1	0,7
Средняя ошибка занижения, % Mean error of understatement, %		**45,5**	**27,0**	**9,5**	**3,6**	**1,2**

Как видно из табл. 2, слишком малое расстояние между озерами (500 м) при их агрегировании приводит к значительному занижению площади зоны термокарста: суммарная площадь доли озер, не попавших в границы зон АТ при d=500 м, составляет на разных ТУ от 35 до 65 % от суммарной площади зон АТ. При задании расстояния d в пределах 3 и 5 км погрешности невелики: средняя ошибка занижения площади составляет 3,6 и 1,2 % соответственно. На долю этих упущенных объектов приходятся малые озера, находящиеся на удалении более 3 км (или 5) от ближайшего озера, обнаруживаемого на снимке Landsat.

Оценка ошибки завышения площади зон. В нашем исследовании ошибка завышения суммарной площади зон АТ определялась как относительная величина площади участков зоны активного термокарста, в пределах которых на снимках высокого пространственного разрешения озер вообще нет либо обнаруживается их крайне незначительное (статистически незначимое) число. Ошибка завышения рассчитывалась с помощью инструмента «Анализ горячих точек» в программном комплексе геоинформационной системы ArcGIS 10.3. Для этого территория каждого тестового участка разбивалась сеткой 1×1 км на квадраты площадью 100 га. Для каждого квадрата по снимкам Канопус-В была рассчитана доля площади, покрытой озерами (степень заозеренности территории). Это позволило сформировать матрицы данных о степени заозеренности на каждом ТУ. Далее проводился анализ матриц данных с использованием метода пространственного корреляционного анализа, реализованного в алгоритмах инструмента «Анализ горячих точек» в программном комплексе ArcGIS 10.3. На рис. 6 для иллюстрации приведены фрагмент снимка Канопус-В и результат проведения пространственного анализа матрицы данных, полученных по этому снимку.



а/a *б/b*

Рис. 6. *Фрагмент космического снимка Канопус-В (а) и результат пространственного анализа данных о совокупностях озер на тестовом участке, полученный с применением алгоритма «горячих точек» (б)*

Fig. 6. *Fragment of Kanopus-V satellite image (a) and the result of a spatial data analysis about set of lakes on the test site based on the algorithm of «hot spots» (b)*

Методические вопросы проведения этого пространственного корреляционного анализа данных о площадях озер, реализуемого с помощью алгоритмов инструмента «Анализ горячих точек», достаточно полно изложены в [21, 22]. Этот анализ предполагает вычисление статистического показателя, характеризующего степень сгущения (или разрежения) озер на территории квадратов, на которые разделяется тестовый участок условной сеткой с размером ячейки 1 км. Квадраты с положительными значениями вычисленного статистического показателя с помощью инструмента «Анализ горячих точек» признаются «горячими точками» и отображают области сгущения озер. А квадраты, для которых получены отрицательные значения показателя, называются «холодными точками», показывающими области разрежения озер, т. е. участки территории, на которых озера отсутствуют либо их число незначительно.

На рис. 6, *б* «горячие» точки показаны красным цветом, а «холодные» – синим. Именно «холодные» точки используются при определении величины ошибки завышения площади зон АТ, возникающей при автоматическом определении границ зон. Для этого путем наложения средствами ГИС полученной матрицы квадратов на карту границ зон активного термокарста можно вычислить для различных значений расстояния d (500, 1000, 2000, 3000 и 5000 м) относительную величину площади участков зон АТ, на которых находятся «холодные» квадраты. Результаты этих вычислений приведены в табл. 3.

Таблица 3. *Ошибки завышения площади зон активного термокарста при разных величинах d*

Table 3. *Errors of overstatement of the thermokarst-active zones areas at different values of d*

Показатель / Index	ТУ TS	Расстояние d, м Distance d, m				
		500	1000	2000	3000	5000
Относительная величина площади участков зоны активного термокарста, в пределах которых озер нет либо их число крайне незначительно, % Relative value of area of the thermokarst-active zones, which contain no lakes or has insignificantly small amount of them, %	1	0,6	1,0	1,3	7,6	10,1
	2	1,7	1,7	2,9	11,1	17,3
	3	1,0	2,5	13,5	16,7	16,7
	4	0,3	3,9	7,7	15,6	21,2
	5	7,2	10,7	17,3	23,5	23,6
	6	0,7	6,1	18,0	20,2	21,5
	7	0,2	5,9	17,7	20,6	21,5
Средняя ошибка завышения, % Mean error of overstatement, %		**1,7**	**4,5**	**11,2**	**16,5**	**18,8**

Выбор оптимального расстояния между озерами в процедуре агрегирования. Определение оптимальной величины расстояния d_{opt} при автоматическом построении границ зон активного термокарста может быть осуществлено путем сравнения величин ошибок занижения и завышения площадей зон, полученных экспериментальным путем для различных значений d и приведенных в табл. 2 и 3. Для этого удобно использовать разность величин этих ошибок при разных расстояниях d (табл. 4).

Таблица 4. *Разность средних значений ошибок занижения и завышения площади зон при разных расстояниях d*

Table 4. *Difference between the mean values of errors of overstatement and the understatement of zones area at different distances d*

d, м/*d*, m	500	1000	2000	3000	5000
Разность ошибок, % Difference of errors, %	43,8	22,5	−1,7	−12,9	−17,6

Как видно в табл. 4, в качестве оптимального расстояния d_{opt} может быть выбрана величина расстояния, равная 2000 м, при котором разность величин ошибок занижения и завышения площади зон принимает минимальное значение. При этом, согласно данным табл. 2 и 3, средние значения ошибок занижения и завышения имеют сравнительно небольшие величины (9,5 и 11,2 % соответственно), что показывает практически приемлемую точность определения границ зон активного термокарста на территориях многолетней мерзлоты на основе разработанной методологии.

Пример практического применения разработанной методологии выявления и картографирования зон активного термокарста

В качестве примера практического применения разработанной методологии выявления зон активного термокарста на рис. 7 приведена карта границ зон активного термокарста на территории прерывистой криолитозоны Западной Сибири, построенная в соответствии с рассмотренной в статье методологией на основе снимков Landsat-8 в комбинации со снимками высокого пространственного разрешения Канопус-В. На основе обработки и анализа спутниковых материалов, представленных в виде мозаики космических снимков Landsat-8, на указанной территории Западной Сибири выявлено более 260 тыс. озер с суммарной площадью около 1,7 млн га, которые были использованы для построения карты границ зон АТ.

Как видно на рис. 7, в зоне прерывистой мерзлоты Западной Сибири наблюдается значительная неравномерность пространственного распределения очагов возникновения и развития термокарстовых процессов. Используя полученную карту зон АТ, определим некоторые характеристики этих зон, демонстрирующие особенности озерно-термокарстовых равнин в пределах зон активного термокарста на территории прерывистой криолитозоны Западной Сибири. Суммарная площадь зон активного термокарста равна 9,1 млн га, что составляет около 30 % площади всей территории прерывистой криолитозоны Западной Сибири, площадь которой равна 30,522 млн га. Заозеренность территории прерывистой криолитозоны Западной Сибири, определяемая как отношение суммарной площади озер к площади всей территории, составляет 5,5 %. А заозеренность территории в границах зон активного термокарста доходит до 18,4 %, что в 3,4 раза превышает соответствующую величину для всей территории прерывистой криолитозоны Западной Сибири.

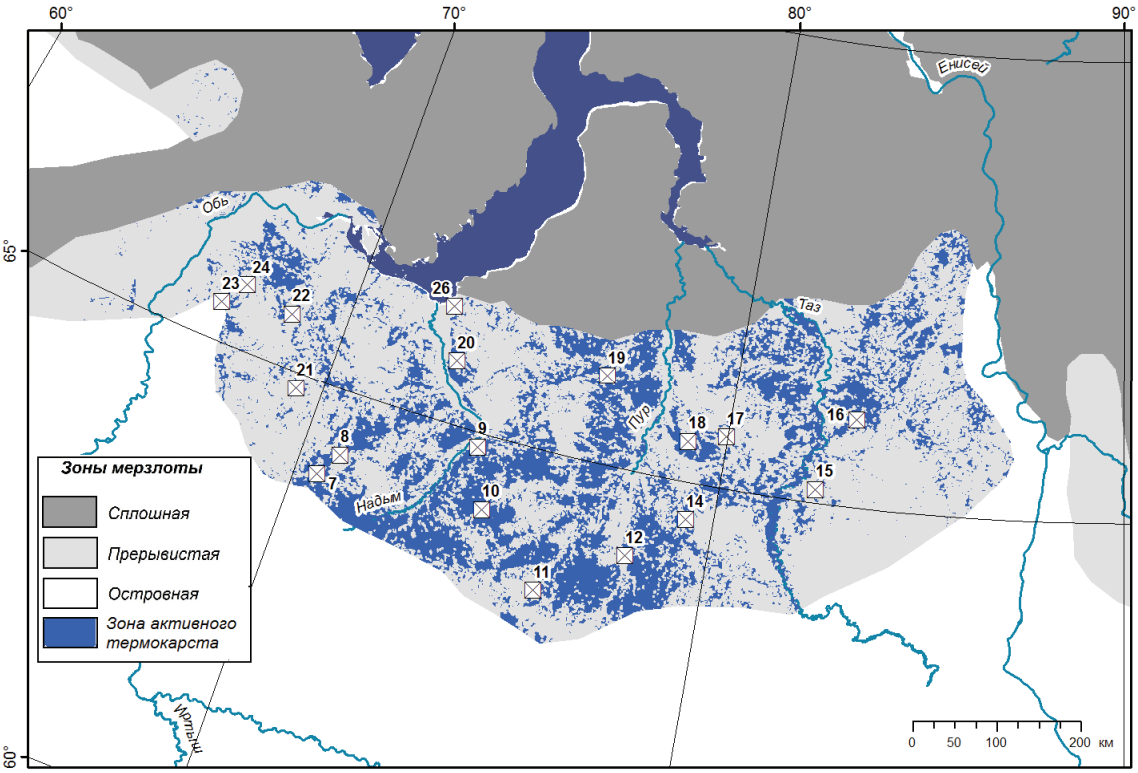


Рис. 7. *Карта зон активного термокарста на территории прерывистого распространения мерзлоты Западной Сибири*

Fig. 7. *Map of thermokarst active zones on the territory of the discontinuous permafrost of Western Siberia*

Заключение

В статье разработаны методические вопросы выявления зон активного термокарста на территориях многолетней мерзлоты, отражающих распространенность озерно-термокарстовых ландшафтов, которые в последнее время проявляют заметную изменчивость в условиях глобального потепления. В связи с высокой степенью заболоченности и труднодоступностью этих территорий предлагаемая методология построения зон активного термокарста предполагает использование дистанционных методов исследования полей термокарстовых озер и средств современных геоинформационных систем для анализа спутниковых изображений.

Для проведения исследований в работе использованы спутниковые снимки среднего (Landsat-8) и высокого (Канопус-В) пространственного разрешения, позволившие с использованием средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3 в автоматическом режиме определять границы зон активного термокарста. Исследованы ошибки занижения и завышения площади зон при автоматическом выявлении их границ по спутниковым снимкам. Показано, что относительные величины этих ошибок составляют около 10 %, что можно считать приемлемым в большинстве практических задач, связанных с изучением термокарстовых процессов и их проявлений в криолитозоне арктических и субарктических территорий.

Приведенная на рис. 7 карта зон активного термокарста может быть использована для определения и обоснования местоположения тестовых (ключевых) участков для проведения дистанционных исследований динамики термокарстовых процессов и эмиссии парниковых газов из термокарстовых озер в условиях современных климатических изменений. Карта зон активного термокарста может быть использована при разработке проектов строительства инфраструктуры и других объектов на территории мерзлоты Западной Сибири. Предложенная методология зонирования территории многолетней мерзлоты по степени активности термокарста на основе спутниковых данных может быть использована для построения карт зон активного термокарста и для других районов многолетней мерзлоты.

Работа выполнена в рамках проекта по договору с Минобрнауки РФ № 14.B25.31.0001 (BIO-GEO-CLIM) от 23.06.2013 г. и при поддержке гранта РФФИ по проекту № 15–45–00075.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. North Siberian lakes: a methane source fueled by Pleistocene Carbon / S.A. Zimov, Y.V. Voropaev, I.P. Semiletov, S.P. Davidov, S.F. Prosiannikov, III F.S. Chapin, M.C. Chapin, S. Trumbore, S. Tyler // Science. – 1997. – V. 277. – P. 800–802.
2. Кароль И.Л. Оценки характеристик относительного вклада парниковых газов в глобальное потепление климата // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 11. – С. 5–12.
3. Methane dynamics in different boreal lake types / S. Juutinen, M. Rantakari, P. Kortelainen, J.T. Huttunen, T. Larmola, J. Alm, J. Sivola, P.J. Martikainen // Biogeosciences. – 2009. – № 6. – P. 209–223.
4. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH_4 flux upscaling / A.F. Sabrekov, B.R.K. Runkle, M.V. Glagolev, I.E. Kleptsova, S.S. Maksyutov // Environ. Res. Lett. – 2014. – № 9. – P. 1–9.
5. Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget // Phil. Trans. R. Soc. – 2007. – V. 365. – P. 1657–1676.
6. Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменения размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли. – 2009. – Т. 13. – № 2 – С. 16–26.
7. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia / O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, S.N. Kirpotin, S. Audry, J. Viers, B. Dupre // Biogeosciences. – 2011. – V. 8. – P. 565–583.
8. Методические вопросы оценки запасов метана в малых термокарстовых озерах в зоне мерзлоты Западной Сибири / Ю.М. Полищук, В.Ю. Полищук, Н.А. Брыксина, О.С. Покровский, С.Н. Кирпотин, Л.С. Широкова // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 127–135.
9. Полищук Ю.М., Брыксина Н.А., Полищук В.Ю. Дистанционный анализ изменения числа и распределения по размерам малых термокарстовых озер криолитозоны Западной Сибири // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 3. – С. 34–42.
10. Luoto M., Seppala M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland // Permafrost and Periglasial Processes. – 2003. – V. 14. – P. 19–27.
11. Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalen, Northern Sweden, especially 1960–1997 // Permafrost and Periglacial Processes. – 2000. – V. 11. – P. 55–69.
12. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting // International Journal of Environmental Studies. – 2009. – V. 66. – № 4. – P. 423–431.
13. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia / G. Grosse, V. Romanovsky, K. Walter, A. Morgenstern, H. Lantuit, S. Zimov // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost (June 29 – July 3, 2008). – Fairbanks, Alaska, 2008. – P. 551–556.
14. Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Криосфера Земли. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 114–120.
15. Karlsson J.M., Lyon S.W., Destouni G. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia // Remote sensing. – 2014. – № 6. – P. 621–636.
16. A global inventory of lakes based on high resolution satellite imagery / C. Verpoorter, T. Kutser, D.A. Seekel, L.J. Tranvik // Geophys. Res. Lett. – 2014. – V. 41. – P. 1–7.
17. Викторов А.С., Капранова В.Н., Трапезникова О.Н. Математическая модель морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин в изменяющихся климатических условиях // Криосфера Земли. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 26–34.
18. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. – М.: Наука, 2006. – 252 с.
19. Кравцова В.И. Распространение термокарстовых озер в России // Вестник Моск. ун-та. Сер. «География». – 2009. – № 3. – С. 33–42.
20. Aggregate poligons. URL: http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//00130000003p000000 (дата обращения: 25.06.2015).

21. Getis A., Ord J.K. The analysis of spatial association by use of distance statistics // Geographical analysis. – 1992. – V. 24. – № 3. – P. 189–206.

22. Ord J.K., Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application // Geographical analysis. – 1995. – V. 27. – № 4. – P. 286–306.

Поступила 23.09.2015 г.

UDC 551.345:528.88

ACTIVE THERMOKARST ZONES ON PERMAFROST TERRITORY AND THEIR DETECTING ON SPACE IMAGES

Yuriy M. Polishchuk,
Ugra Research Institute of Information Technology, 151, Mira Street, Khanty-Mansiysk, 628011, Russia. E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Alexander N. Bogdanov,
Ugra Research Institute of Information Technology, 151, Mira Street, Khanty-Mansiysk, 628011, Russia. E-mail: bogdanovan@uriit.ru

The relevance *of the paper is caused by the need to develop methods of identifying and mapping the areas of active thermokarst processes on the permafrost territory, based on satellite images and geoinformation technologies in the context of assessing the accumulation of methane in thermokarst lakes, which are considered as the most active sources of methane emissions into the atmosphere in the Arctic and sub-Arctic regions in the global warming of recent decades.*

The main aim of the study *is to develop methodical questions to identify areas of distribution of thermokarst lakes in permafrost and map their boundaries, based on remote sensing and GIS tools.*

Methods used in the study*: remote sensing of the thermokarst lakes spatial structure, including the little-studied small lakes, using satellite images of middle and high spatial resolution; methods of geographic information systems for spatial and statistical analysis of satellite images of fields of thermokarst lakes in the frozen thermokarst landscapes.*

The results*. The authors developed methodical questions and described the procedure of active thermokarst zones detection as the areas of the dissemination of thermokarst lakes in the frozen landscape and determination of the boundaries of these zones based on Landsat-8 images and Kanopus-V high resolution images. A collection of Landsat-8 and Kanopus-V images obtained in summer of 2013–2014 was also formed. Using the developed methodology, the authors defined the boundaries and developed the map of active thermokarst zones on the territory of the discontinuous permafrost of Western Siberia.*

Key words:
Permafrost, global warming, thermokarst lakes, geoinformation systems, satellite images.

The research was carried out within the framework of the project under the contract with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 14.B25.31.0001 (BIO-GEO-CLIM) dated 23 June, 2013 and supported by RFBR grant No. 15–45–00075.

REFERENCES

1. Zimov S.A., Voropaev Y.V., Semiletov I.P., Davidov S.P., Prosiannikov S.F., Chapin III F.S., Chapin M.C., Trumbore S., Tyler S. North Siberian lakes: a methane source fueled by Pleistocene Carbon. *Science*, 1997, vol. 277, pp. 800–802.
2. Karol I.L. Otsenki kharakteristik otnositelnogo vklada parnikovykh gazov v globalnoe poteplenie klimata [Evaluation of the relative contribution of greenhouse gases in global warming]. *Meteorology and hydrology*, 1996, no. 11, pp. 5–12.
3. Juutinen S., Rantakari M., Kortelainen P., Huttunen J.T., Larmola T., Alm J., Sivola J., Martikainen P.J. Methane dynamics in different boreal lake types. *Biogeosciences*, 2009, no. 6, pp. 209–223.
4. Sabrekov A.F., Runkle B.R.K., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Maksyutov S.S. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH_4 flux upscaling. *Environ. Res. Lett.*, 2014, no. 9, pp. 1–9.
5. Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget. *Phil. Trans. R. Soc.*, 2007, vol. 365, pp. 1657–1676.
6. Kravtsova V.I., Bystrova A.G. Izmeneniya razmerov termokarstovykh ozer v razlichnykh rayonakh Rossii za poslednie 30 let [Changes of thermokarst lake areas in different regions of Russia for the last three decades]. *Cryosphere of Earth*, 2009, vol. 13, no. 2, pp. 16–26.
7. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., Dupre B. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia. *Biogeosciences*, 2011, vol. 8, pp. 565–583.
8. Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu., Bryksina N.A., Pokrovskiy O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S. Metodicheskie voprosy otsenki zapasov metana v malykh termokarstovykh ozerakh v zone merzloty Zapadnoy Sibiri [Methodical issues for evaluating

methane reserves in small thermokarst lakes in the permafrost of Western Siberia]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 127–135.
9. Polishchuk Yu.M., Bryksina N.A., Polishchuk V.Yu. Distantsionnyy analiz izmeneniya chisla i raspredeleniya po razmeram malykh termokarstovykh ozer kriolitozony Zapadnoy Sibiri [Remote analysis of changes in the number and distribution of small thermokarst lakes by sizes in cryolithozone of Western Siberia]. *Study of Earth from Space*, 2015, no. 3, pp. 34–42.
10. Luoto M., Seppala M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, vol. 14, pp. 19–27.
11. Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalen, Northern Sweden, especially 1960–1997. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, vol. 11, pp. 55–69.
12. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting. *International Journal of Environmental Studies*, 2009, vol. 66, no. 4, pp. 423–431.
13. Grosse G., Romanovsky V., Walter K., Morgenstern A., Lantuit H., Zimov S. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia. *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost* (June 29 – July 3, 2008). Fairbanks, Alaska, 2008. pp. 551–556.
14. Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. Analiz izmeneniya chislennosti termokarstovykh ozer v zone merzloty Zapadnoy Sibiri na osnove kosmicheskikh snimkov [Analysis of changes in the number of thermokarst lakes in permafrost of Western Siberia on the basis of satellite images]. *Cryosphere of Earth*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 114–120.
15. Karlsson J.M., Lyon S.W., Destouni G. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia. *Remote sensing*, 2014, no. 6, pp. 621–636.
16. Verpoorter C., Kutser T., Seekel D.A., Tranvik L.J. A global inventory of lakes based on high resolution satellite imagery. *Geophys. Res. Lett*., 2014, vol. 41, pp. 1–7.
17. Viktorov A.S., Kapranova V.N., Trapeznikova O.N. Matematicheskaya model morfologicheskoy struktury ozerno-termokarstovykh ravnin v izmenyayushchikhsya klimaticheskikh usloviyakh [Mathematical model of the lacustrine-thermokarst plain morphostructure under the changing climatic conditions]. *Cryosphere of Earth*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 26–34.
18. Viktorov A.S. *Osnovnye problemy matematicheskoy morfologii landshafta* [Main problems of landscape mathematical morphology]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 252 p.
19. Kravtsova V.I. Rasprostranenie termokarstovykh ozer v Rossii [Dissemination of thermokarst lakes in Russia]. *Vestnik of Moscow State University. Geography*, 2009, no. 3, pp. 33–42.
20. *Aggregate Poligons.* Available at: http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//00130000003p000000 (accessed 25 June 2015).
21. Getis A., Ord J.K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical analysis*, 1992, vol. 24, no. 3, pp. 189–206.
22. Ord J.K., Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical analysis*, 1995, vol. 27, no. 4, pp. 286–306.

Received: 23 September 2015.