

УДК 551.345:528.88

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ МЕТАНА В МАЛЫХ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕРАХ КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Полищук Юрий Михайлович,

д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр. лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; гл. науч. сотр. научно-исследовательского информационного центра ФГБУН «Институт химии нефти СО РАН», Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Полищук Владимир Юрьевич,

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; науч. сотр. научно-исследовательского информационного центра ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН», Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3. E-mail: vy_polishchuk@hotmail.com

Брыксина Наталья Анатольевна,

канд. геогр. наук, ст. науч. сотр. института прикладной информатики и математической геодезии ФГБОУ ВПО «Балтийский Федеральный университет имени И. Канта», Россия, 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14. E-mail: bryksina83@gmail.com

Покровский Олег Сергеевич,

канд. геол.-минерал. наук, зав. лабораторией биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: oleg@get.obs-mip.fr

Кирпотин Сергей Николаевич,

д-р биол. наук, проф., директор Центра превосходства «Bio-Clim-Land» ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: kirp@mail.tsu.ru

Широкова Людмила Сергеевна,

канд. биол. наук, доцент лаборатории наук о Земле и окружающей среде университета Тулузы, France, 31400, Toulouse, Avenue Edouard Belin, 14. E-mail: liudmila@get.obs-mip.fr

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки методических вопросов использования математического моделирования и космоснимков сверхвысокого разрешения для оценки накопления метана в малых термокарстовых озерах в зоне мерзлоты, которые рассматриваются в качестве наиболее активных источников эмиссии метана в атмосферу в арктических и субарктических районах в условиях глобального потепления последних десятилетий.

Цель исследования: разработка методических вопросов оценки объемов накопления метана в термокарстовых озерах в зоне многолетней мерзлоты на основе математического моделирования и космических снимков сверхвысокого разрешения.

Методы исследования: дистанционные методы исследования полей термокарстовых озер, включая малые озера, с использованием спутниковых снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, методы геоинформационных систем для анализа спутниковых изображений, методы математического моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озер в мерзлотных ландшафтах, методы биогеохимических исследований состава воды в озерах для определения концентрации метана.

Результаты. На основе биогеохимических исследований установлено, что концентрация метана в малых термокарстовых озерах (площадью менее 200–250 м²) в среднем приблизительно в 13 раз превышает концентрацию метана в воде озер, площадь которых более 250 м². На основе данных дистанционных исследований по снимкам сверхвысокого разрешения определены параметры модели, что позволяет осуществить расчёт полей термокарстовых озер применительно к условиям многолетней мерзлоты. Разработана и описана процедура определения объемов накопления метана в термокарстовых озерах, расположенных на определенной территории в зоне мерзлоты.

Ключевые слова:

Многолетняя мерзлота, геоинформационные системы, спутниковые снимки, изменение климата, математическое моделирование.

Введение

Современное глобальное потепление климата, наиболее явно проявляющееся в северных широтах планеты, ускоряет деградацию многолетней мерзлоты. Мерзлота, являясь хранилищем законсервированного углерода в обширных мерзлых торфяных болотах Сибири и Северной Америки, при потеплении климата может стать источником возникновения еще большего потепления при высвобождении парниковых газов [1]. Углерод в настоящее время находится в связанном состоянии как органическое вещество в слое многолетней мерзлоты на большей части Арктики. Потепление климата может создать положительную обратную связь, при которой более сильное потепление будет приводить к дополнительному высвобождению метана как продукта жизнедеятельности микроорганизмов, перерабатывающих оттаявшее органическое вещество, что способно внести ощутимый вклад в потепление климата.

Среди парниковых газов метан занимает особое место. По вкладу в парниковый эффект он является вторым после углекислого газа. Однако по величине прямого потенциала глобального потепления он в 39 раз, по данным [2] (в расчете на единицу концентрации и для периода 20 лет), превышает углекислый газ. Основными источниками эмиссии метана на северных территориях являются болота и переувлажненные ландшафты, термокарстовые озерные равнины, подводные метангидраты шельфовых морей и крупных водоемов в зоне многолетней мерзлоты и др. По оценкам [1], четверть мирового объема метана сосредоточена в Западной Сибири, значительную часть территории которой занимают своеобразные болотно-озерные ландшафты с бесчисленным множеством озер разных размеров и возраста. Поля термокарстовых озер наиболее чувствительны к росту приземной температуры воздуха, что делает их удобными геоморфологическими индикаторами глобального потепления в дистанционных исследованиях.

Согласно [3, 4], наиболее активным источником эмиссии метана в арктических и субарктических районах являются малые термокарстовые озера (с площадью менее 0,01–0,05 га). Образование термокарстовых водоемов в связи с деградацией многолетней мерзлоты в условиях глобального потепления последних десятилетий наблюдается на Аляске, в Канаде, в Европе, в Сибири [5–9]. В связи с труднодоступностью территорий в зоне мерзлоты исследования изменений термокарстовых озер проводят дистанционными методами. В большинстве таких дистанционных исследований использовались и используются космические снимки Landsat (пространственное разрешение 30 м), архивы которых накапливаются уже четыре десятилетия. Однако малые озера из-за своих небольших размеров не обнаруживаются на снимках Landsat, что требует для их изучения использования снимков высокого и сверхвысокого разреше-

ния, например, Quick Bird с разрешением 0,61 м. Из-за малой ширины полосы съемки (16,5 км для Quick Bird) покрытие территории многолетней мерзлоты такими снимками не превышает единиц процентов, что не позволяет достаточно обоснованно оценить вклад эмиссии метана из малых термокарстовых озер в общий парниковый эффект. Поэтому малые озера, как правило, не учитываются в прогнозных оценках динамики накопления парниковых газов в атмосфере в условиях продолжающегося глобального потепления климата. Более полный учет распространения малых озер на территории мерзлоты возможен с использованием моделирования полей термокарстовых озер, основанного на имитационном подходе [10]. Однако методические вопросы использования математического моделирования и космоснимков сверхвысокого разрешения для оценки объемов термокарстового метана в мерзлотных ландшафтах в настоящее время не разработаны.

В связи с изложенным целью настоящего исследования заключается в разработке методических вопросов оценки объемов накопления метана в термокарстовых озерах в зоне многолетней мерзлоты на основе математического моделирования и космических снимков сверхвысокого разрешения.

Экспериментальный анализ статистических свойств полей термокарстовых озер по космическим снимкам сверхвысокого разрешения

Данные и объект исследования. Исследования проводились на территории Западной Сибири с использованием космических снимков Quick Bird, коллекция которых в распоряжении авторов была достаточно ограниченной и включала 12 снимков. В связи с этим выбор тестовых участков (ТУ) для проведения исследований производился в границах сцен космических снимков в местах активного термокарста [11], определяемого по наибольшему сгущению озер. Общая характеристика выбранных тестовых участков дана в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика тестовых участков и даты съемки
Table 1. Characteristics of test areas (TA) and imaging date

ТУ TA	Тип мерзлоты Permafrost type	Широта	Долгота	Дата съемки Imaging date	Площадь участка, км ² Plot area, km ²
		Latitude град.	Longitude /degree		
1	Островная Insular	63,02	72,53	13.07.2007	47,52
2	Прерывистая Discontinuous	63,07	75,54	30.06.2009	192,80
3		65,29	72,11	01.05.2009	383,80
4		66,09	74,37	15.08.2003	281,12
5		65,52	76,37	05.07.2008	545,46
6		66,35	80,17	28.07.2004	297,91
7		67,51	84,55	28.06.2011	87,49
8	Сплошная Continuous	66,49	70,14	04.07.2008	131,93
9		67,20	74,26	02.08.2004	346,58
10		67,12	78,43	28.08.2005	199,77
11		69,51	72,18	24.08.2003	204,03
12		69,30	68,20	03.08.2006	98,30

Согласно [11], 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 районах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород криолитозоны распространены преимущественно озера термокарстового происхождения либо озера смешанного генезиса при значительном влиянии термокарстовых процессов. Например, в работах В.И. Кравцовой с соавторами [12, 13] на основе геоморфологического и климатического анализа вся криолитозона Западной Сибири отнесена к числу районов с повсеместным распространением термокарстовых озер. Поэтому озера, исследуемые в настоящей работе дистанционным методом, рассматриваются как термокарстовые озера.

Для проверки репрезентативности выбранных в нашей работе тестовых участков с учетом зональной специфики геокриологической и ландшафтной дифференциации исследуемой территории проводилось сопоставление схемы размещения ТУ с картами геокриологического и ландшафтного зонирования территории Западной Сибири [14, 15]. На рис. 1 представлена карта-схема расположения

подзона многолетней мерзлоты Западной Сибири, на которой видно, что выбранные тестовые участки довольно равномерно распределены по территории исследований.

Распределение тестовых участков по подзонам мерзлоты дано в табл. 2. В наиболее интересных для наших исследований подзонах прерывистого и сплошного распространения многолетней мерзлоты выбрано 6 и 5 тестовых участков соответственно.

Таблица 2. Распределение тестовых участков по подзонам многолетней мерзлоты

Подзоны мерзлоты Permafrost subzones	Количество ТУ Quantity of TA	ТУ/ТА
Сплошная/Continuous	5	ТУ-2–ТУ-7
Прерывистая/Discontinuous	6	ТУ-8–ТУ-12
Островная/Insular	1	ТУ-1

Table 2. Distribution of test areas over permafrost subzones

Аналогично вышеизложенному проведено сопоставление схемы размещения выбранных ТУ карте ландшафтного зонирования [15]. В результате установлено распределение тестовых участков по ландшафтным зонам, представленное в табл. 3, которая показывает, что тестовые участки достаточно равномерно распределены по ландшафтным зонам исследуемой территории.

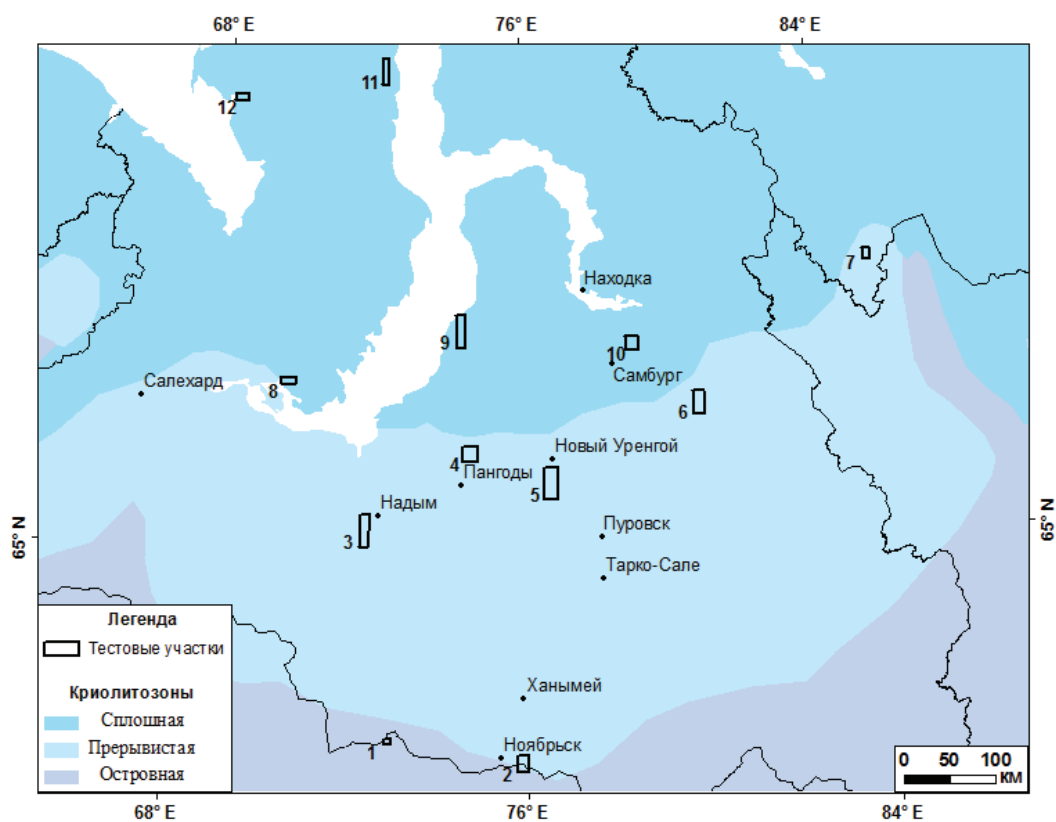


Рис. 1. Карта-схема геокриологического зонирования территории многолетней мерзлоты Западной Сибири с обозначенными границами тестовых участков

Fig. 1. Schematic map of geocryologic zoning of permafrost territory in Western Siberia with marked boundaries of test areas

Таблица 3. Распределение тестовых участков по ландшафтными зонам

Table 3. Test area distribution over landscape zones

Ландшафтные зоны Landscape zones	Количество ТУ Amount of TA
Типичная тундра/Typical tundra	2
Южная тундра/South tundra	3
Лесотундра/Forest tundra	2
Северная тайга/Northern taiga	2
Средняя тайга/Medium taiga	3

Согласно табл. 1, все 12 безоблачных космических снимков Quick Bird, выбранных для проведения дистанционных исследований, получены во второй половине летних сезонов (в основном в июле–августе, когда полностью исчезает ледовый покров озер, мешающий выделению озер при дешифрировании снимков) в сравнительно короткий 6-летний период 2003–2009 гг. Обработка космических снимков проведена с использованием стандартных средств геоинформационной системы ENVI 4.4. На каждом из тестовых участков определялось от нескольких сотен до десятков тысяч термокарстовых озер сравнительно малых размеров.

Результаты дистанционных исследований. Рассмотрим результаты анализа данных дистанционного измерения площадей термокарстовых озер на исследованной территории по снимкам сверхвысокого разрешения. Данные о суммарных площадях озер и их средних значениях на всех ТУ приведены в табл. 4. Расчеты показывают, что усредненные по территории прерывистой и сплошной зон мерзлоты средние значения площадей озер составили 2818 и 3506 м² соответственно. Эти данные с учетом среднего значения площади озер в островной зоне (на ТУ-1 в табл. 4) позволяют сделать заключение, что в среднем площади озер увеличиваются в направлении «юг–север».

Таблица 4. Статистика термокарстовых озер по данным дистанционного исследования на разных тестовых участках

Table 4. Statistics of thermokarst lakes according to the data of remote investigation on different test areas

ТУ TA	Число озер Amount of lakes	Суммарная площадь озер, м ² Total area of lakes, m ²	Среднее значение площади озер, м ² Average value of area of lakes, m ²
1	20052	2855567,6	2624,6
2	1088	34026648,5	1696,9
3	18494	13582835,4	734,4
4	3523	9828450,8	2789,8
5	4874	43518058,7	8928,6
6	23962	16984441,8	708,8
7	4320	8851926,7	2049,1
8	8564	15585387,9	1819,9
9	471	1777560,3	3774,0
10	8336	5672160,3	680,4
11	865	3606856,3	4169,8
12	810	5739587,5	7085,9

Очень важным с точки зрения моделирования полей термокарстовых озер является исследование распределения озер по их размерам. Для всех исследованных ТУ на основе результатов дистанционного измерения площадей озер были построены гистограммы распределения числа термокарстовых озер по размерам. Для иллюстрации на рис. 2 приведена гистограмма распределения озер по площадям на ТУ-1, где K_i – относительное число озер, попадающих в каждый i -й интервал гистограммы, определяемое по формуле:

$$K_i = \frac{n_i}{N},$$

где n_i – число озер в каждом интервале гистограммы; i – номер интервала; N – суммарное количество озер на исследуемом тестовом участке.

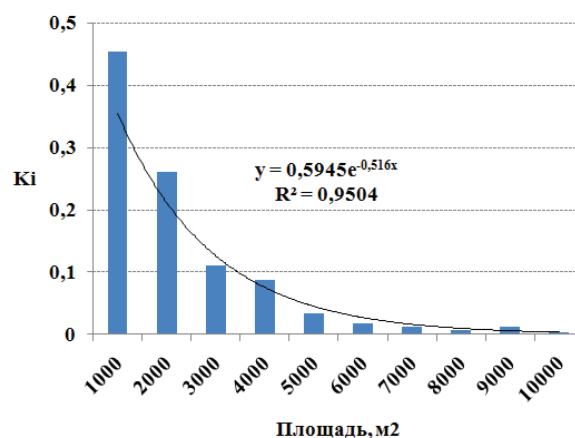


Рис. 2. Пример экспоненциальной аппроксимации эмпирического распределения термокарстовых озер по площадям на ТУ-1

Fig. 2. Exponential approximation of empiric distribution of thermokarst lakes over the areas in TA-1

График гистограммы на рис. 2 демонстрирует характерную закономерность – уменьшение относительного числа озер в интервалах гистограмм по мере увеличения площадей озер. Такая же закономерность была выявлена ранее [10] при анализе аналогичных гистограмм распределения озер по площадям, полученных по результатам дистанционного измерения площадей озер по космическим снимкам Landsat (пространственное разрешение 30 м). Анализ гистограмм распределения озер по площадям показал [16, 17] их хорошее соответствие (по критерию χ^2) экспоненциальному закону распределения. По аналогии с [16, 17] в настоящей работе гистограмма распределения малых озер по их площадям, представленная на рис. 2, допускает аппроксимацию экспоненциальной функцией с высоким уровнем коэффициента детерминации (0,95). Проведенный в нашей работе анализ гистограмм распределения озер по размерам на всех остальных ТУ показал достаточно хорошую аппроксимацию их экспоненциальной функцией, что является основанием использова-

ния разработанной в [16] геоимитационной модели для моделирования полей термокарстовых озер, включающих озера малых размеров.

Краткая характеристика модели пространственной структуры полей термокарстовых озер

Предложенная в [10] геоимитационная модель пространственной структуры полей термокарстовых озер представляет собой совокупность случайных окружностей, каждая из которых отображает в модели отдельное термокарстовое озеро. Возможность выбора окружности в качестве формы береговых границ моделируемых термокарстовых озер экспериментально подтверждена в [18].

Анализ гистограмм распределения координат центров озер на плоскости, проведенный в [16], показал, что экспериментальные законы распределения координат центров озер соответствуют по критерию χ^2 с вероятностью 95 % закону равномерной плотности. Согласно [16, 17], экспериментальные законы распределения термокарстовых озер по их площадям соответствуют экспоненциальному закону распределения. Поэтому в предложенной модели распределение окружностей по их размерам также будет подчиняться экспоненциальному закону в виде:

$$y = \lambda e^{-\lambda s}, \quad (1)$$

где λ – параметр распределения (1).

Ниже приведены следующие основные положения [17], определяющие существенные свойства геоимитационной модели полей термокарстовых озер:

- 1) формы береговых границ озер 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 $x_i, y_i, i=1, n$, определяется законом равномерной плотности;
- 4) случайное распределение окружностей по их размерам определяется показательным законом распределения в виде (1) с параметром λ , который определяется по экспериментальным данным на основе дистанционных исследований. Согласно [16, 17], значение параметра λ для моделирования озер на каждом тестовом участке рассчитывается как величина, обратная экспериментально определенной по космическим снимкам средней площади озер на данном тестовом участке.

Разработанный программный комплекс имитационного моделирования полей термокарстовых водных объектов достаточно подробно описан в [19]. Результат моделирования представляется в виде модельного поля озер (рис. 3), пространственные статистические свойства которого соответствуют экспериментально установленным по спутниковым снимкам. Материалы исследований

[17, 19] подтверждают адекватность модели экспериментальным данным.

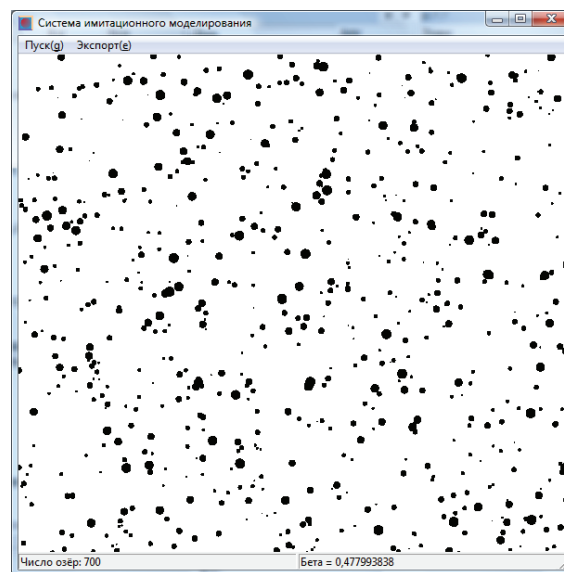


Рис. 3. Модельное поле термокарстовых озер

Fig. 3. Model field of thermokarst lakes

Расчет объема накопления метана в термокарстовых озерах Западной Сибири на основе моделирования полей термокарстовых озер

Для определения объема накопления метана в термокарстовых озерах требуется знать его концентрацию в воде каждого озера и его площадь и глубину. Результаты наземных биогеохимических исследований концентрации метана в термокарстовых озерах, которые проводились в зоне мерзлоты Западной Сибири в период 2008–2013 гг., опубликованы в работах О.С. Покровского с соавторами [3, 20, 21].

Важными для решения поставленной задачи являются вопросы исследования взаимосвязи между концентрацией метана в воде термокарстовых озер и их площадями. В [3, 20, 21] на основе анализа результатов биогеохимических исследований состава воды термокарстовых озер установлено, что концентрация метана существенно зависит от размеров озер: в малых озерах с площадью менее нескольких сотен квадратных метров она более чем на порядок превышает ее величину в больших озерах с размерами, превышающими указанные выше.

На рис. 4 представлен график зависимости концентрации метана в озерной воде от площади термокарстовых озер по результатам биогеохимических исследований термокарстовых озер криолитозоны Западной Сибири, методика которых изложена в ряде наших работ, например в [21]. На графике красные точки представляют измеренные значения концентрации метана в отдельных малых озерах с площадью менее 250 м², а синими точками отображаются измеренные значения кон-

центрации метана в озерах с площадью более 250 м². Отрезки сплошных линий красного и синего цвета показывают средние значения концентрации метана в малых и больших озерах соответственно. Из графика на рис. 4 видно, что концентрация метана в малых озерах (площадь менее 200–250 м²) в среднем приблизительно в 13 раз превышает концентрацию метана в воде озер, площадь которых более 250 м².

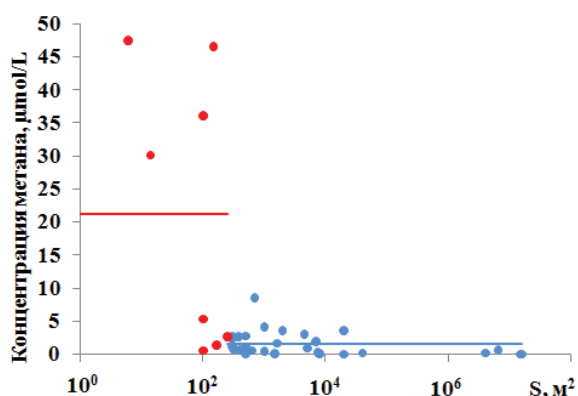


Рис. 4. Зависимость концентрации метана от площади термокарстовых озер

Fig. 4. Dependence of methane concentration on area of thermokarst lakes

Как показали результаты наземных исследований в термокарстово-озерных равнинах Западной Сибири, глубина озер также зависит от их размеров. В связи с этим представляет интерес изучить взаимосвязь глубины и площади термокарстовых озер. Вид этой зависимости необходимо учитывать при определении объема воды в озерах при расчете массы накопленного метана в озерах, расположенных на определенной территории. На рис. 5 представлена зависимость глубины термокарстовых озер от их площади, основанная на результатах измерения глубины и площади 34 реальных озер различных размеров, расположенных на территории многолетней мерзлоты в Западной Сибири.

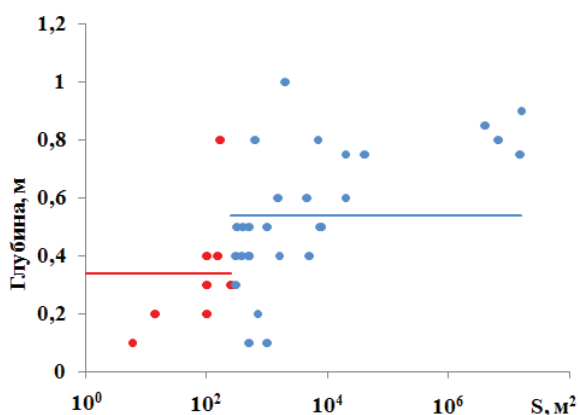


Рис. 5. Зависимость глубины термокарстовых озер от их площади

Fig. 5. Dependence of the depth of thermokarst lakes on their area

На рис. 5, как и на предыдущем графике, озера условно разделены на 2 группы: малые, с площадью менее 250 м² (обозначены на графике красными точками), и сравнительно большие (показаны синими точками), площадь которых превышает 250 м². Из графика на рис. 5 видно, что в среднем глубина больших озер приблизительно в 1,5 раза превышает глубину малых озер. По данным измерений глубина малых и больших озер в среднем составляет 0,34 и 0,54 м соответственно. Эти величины могут быть использованы при оценке запасов метана в термокарстовых озерах на основе моделирования.

Масса метана, накопленного в n озерах, расположенных на рассматриваемой территории мерзлоты, может быть рассчитана в виде:

$$M = \sum_{i=1}^n m_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где m_i – масса метана в i -м озере.

Масса накопленного метана в каждом i -м озере может быть определена по формуле:

$$m_i = C_i h_i S_i, \quad (3)$$

где C_i – концентрация метана в воде i -го озера; h_i – глубина i -го озера; S_i – площадь i -го озера.

Процедура оценки объемов накопленного метана в водных термокарстовых объектах на заданной территории мерзлоты на основе геоимитационного моделирования заключается в следующем. В процессе моделирования полей этих объектов находится площадь каждого i -го модельного объекта. В зависимости от величины площади (больше или меньше 250 м²) определяются средние значения концентрации метана и глубины озера (рис. 4, 5) и рассчитывается в соответствии с (3) масса метана в данном i -м модельном озере. Затем по формуле (2) рассчитывается общая масса накопленного метана во всех модельных озерах на заданной территории мерзлоты.

Заключение

В статье рассмотрены методические вопросы использования математического моделирования и космоснимков сверхвысокого разрешения для оценки накопления метана в малых термокарстовых озерах в зоне мерзлоты, которые рассматриваются как наиболее активные источники эмиссии метана в атмосферу в арктических и субарктических районах в условиях глобального потепления последних десятилетий. Такие озера из-за своих малых размеров до сих пор, как правило, не учитываются в прогнозах динамики накопления парниковых газов в атмосфере.

Для проведения исследований использованы дистанционные методы исследования полей термокарстовых озер на основе спутниковых снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, методы геоинформационных систем для анализа спутниковых изображений, методы математического моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озер в мерзлот-

ных ландшафтах, методы биогеохимических исследований состава воды в озерах с целью определения концентрации метана. На основе биогеохимических исследований установлено, что концентрация метана в малых термокарстовых озерах (площадью менее 200–250 м²) в среднем приблизительно в 13 раз превышает концентрацию метана в воде озер, площадь которых более 250 м².

На основе экспериментальных данных, полученных по снимкам сверхвысокого разрешения, определены параметры геоимитационной модели, позволяющей осуществить математическое моде-

лирование полей термокарстовых озер применительно к условиям мерзлотных ландшафтов арктических регионов. Разработана и описана процедура определения объемов накопления метана в озерах, расположенных на определенной территории мерзлоты, на основе результатов математического моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озер.

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 грантов РФФИ по проектам № 14-35-50521 мол_нр и № 14-01-31489 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глобальные изменения климата: «метановая бомба» – наукообразный миф или потенциальный сценарий? / А.И. Жилиба, Г.А. Вандышева, К.Г. Грибанов, В.И. Захаров // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. – 2011. – Т. 2. – № 1 (3). URL: http://www.wold.ugrasu.ru/international/unesco/journal/content/2011_1/documents/Zhiliba.pdf (дата обращения: 19.11.2014).
2. Кароль И.Л. Оценки характеристик относительного вклада парниковых газов в глобальное потепление климата // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 11. – С. 5–12.
3. 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. DOI: 10.5194/bg-8-565-2011.
4. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH₄ 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. DOI: 10.1088/1748-9326/9/4/045008.
5. Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // J. Geophys. Res. – 2006. – V. 111. – P. 1–11. DOI: 10.1029/2005JG000150.
6. 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.
7. 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. – Fairbanks, Alaska, June 29 – July 3, 2008. – P. 551–556.
8. Luoto M., Seppala M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland // Permafrost and Periglacial Processes. – 2003. – V. 14. – P. 19–27.
9. Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 4. – С. 88–96.
10. Полищук Ю.М., Полищук В.Ю. Имитационное моделирование полей термокарстовых озер на территории многолетней мерзлоты // Информационные системы и технологии. – 2011. – № 1. – С. 53–60.
11. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. – М.: Наука, 2006. – 252 с.
12. Кравцова В.И. Распространение термокарстовых озер в России // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. География. – 2009. – № 3. – С. 33–42.
13. 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.
14. Атлас СССР / отв. ред. Т.П. Сидоренкова. – М.: Главное управление геодезии и картографии при СМ СССР, 1984. – 260 с.
15. Ландшафтная карта СССР / под ред. И.С. Гудилина. – М.: Моск. госуд. университет, 1987. URL: http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/data/landscapes/ (дата обращения: 19.11.2014).
16. Полищук Ю.М., Полищук В.Ю. Имитационное моделирование полей термокарстовых озер на территории многолетней мерзлоты // Информационные системы и технологии. – 2011. – № 1. – С. 53–60.
17. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6 // In Book: Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems / Ed. by O. Pokrovsky. – NY: Nova Science Publishers, 2014. – P. 205–234. DOI: 10.978-94-007-4569-8.
18. Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Дистанционные исследования изменчивости формы береговых границ термокарстовых озер на территории вечной мерзлоты Западной Сибири // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 1. – С. 61–64.
19. Полищук В.Ю. Программный комплекс имитационного моделирования динамики полей термокарстовых озер в зонах вечной мерзлоты // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 1. – С. 125–128.
20. Early diagenesis processes and their effect on organic matter mineralization and trace element post-depositional redistribution in Western Siberia thermokarst lakes / S. Audry, O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova et al. // Biogeosciences Discuss. – 2011. – V. 8. – P. 8845–8894. DOI: 10.5194/bgd-8-8845-2011.
21. Покровский О.С., Широкова Л.С., Кирпотин С.Н. Микробиологические факторы, контролирующие цикл углерода в термокарстовых водных объектах Западной Сибири // Вестник ТГУ. Биология. – 2012. – № 3. – С. 199–217.

Поступила 21.11.2014 г.

UDC 551.345:528.88

METHODICAL ISSUES OF EVALUATING METHANE CAPACITY IN SMALL THERMOKARST LAKES OF WESTERN SIBERIA PERMAFROST

Yury M. Polishchuk,

Dr. Sc., Tomsk State University, 36, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Vladimir Yu. Polishchuk,

Cand. Sc., Tomsk State University, 36, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: vy_polishchuk@hotmail.com

Natalia A. Bryksina,

Cand. Sc., Kant Baltic Federal University, 14, A. Nevskogo Street,
Kaliningrad, 236041, Russia. E-mail: bryksina83@gmail.com

Oleg S. Pokrovsky,

Cand. Sc., Tomsk State University, 36, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: oleg@get.obs-mip.fr

Sergey N. Kirpotin,

Dr. Sc., Tomsk State University, 36, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: kirp@mail.tsu.ru

Liudmila S. Shirokova,

Cand. Sc., University of Toulouse, UMR 5563 CNRS, 14, Avenue Edouard Belin,
31400, Toulouse, France. E-mail: liudmila@get.obs-mip.fr

The relevance of the paper is caused by the need to develop methodological issues of using mathematical modeling and ultrahigh resolution satellite imagery to assess the accumulation of methane in small thermokarst lakes in the permafrost zone, which are considered as the most active sources of methane emissions to the atmosphere in the Arctic and Subarctic regions under global warming of recent decades.

The main aim of the study is to develop methodological issues of assessing the amount of methane accumulation in thermokarst lakes in the permafrost, based on mathematical modeling and ultrahigh resolution satellite images.

Methods: remote sensing of thermokarst lakes fields, including small lakes, using satellite images of high and very high spatial resolution and techniques of geographic information systems for the analysis of satellite images, the methods of mathematical modeling of the spatial structure of the thermokarst lakes fields in permafrost landscapes, methods of biogeochemical studies of water bodies to determine the concentration of methane.

The results. On the basis of biogeochemical studies the authors have determined that methane concentration in small thermokarst lakes (with area less than 200–250 m²) is on average about 13 times higher than its concentration in water of lakes, which are more than 250 m². Based on the remote research data on high resolution images the authors defined the parameters of the model that allows calculating fields of thermokarst lakes in the conditions of permafrost. The authors developed and described the procedure for determining methane accumulation volumes in thermokarst lakes located in a particular territory of the permafrost zone.

Key words:

Permafrost, geoinformation systems, satellite imagies, climate changing, mathematical modeling.

The research was carried out within the project under the agreement with the Ministry of Education and Science of the RF no. 14.B25.31.0001 (BIO-GEO-CLIM), 23.06.2013, supported by the grants of RFBR by the projects no. 14–35–50521 мол_нр и № 14–01–31489 мол_а.

REFERENCES

1. Zhiliba A.I., Vandysheva G.A., Gribov K.G., Zakharov V.I. Globalnye izmeneniya klimata: «metanovaya bomba» – naukoobrazny mif ili potentsialny stsenary? [Global change of climate: «Methane bomb» is a pseudoscientific myth or potential scenario?]. *Environmental dynamics and global change of climate*, 2011, vol. 2, no. 1 (3). Available at: [http://wwwold.ugrasu.ru/international/unesco/journal/content/2011_1/documents/ Zhiliba.pdf](http://wwwold.ugrasu.ru/international/unesco/journal/content/2011_1/documents/Zhiliba.pdf) (accessed 19 November 2014).
2. Karol I.L. Otsenki kharakteristik odnositel'nogo vklada parnikovykh gazov v globalnoye potepeniye klimata [Evaluation of the relative contribution of greenhouse gases in global warming]. *Me-teorology and hydrology*, 1996, no. 11, pp. 5–12.
3. 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. DOI: 10.5194/bg-8-565-2011.

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 CH₄ flux upscaling. *Environ. Res. Lett.*, 2014, no. 9, pp. 1–9. DOI: 10.1088/1748-9326/9/4/045008.
5. Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images. *J. Geophys. Res.*, 2006, vol. 111, pp. 1–11. DOI: 10.1029/2005JG000150.
6. Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalén, Northern Sweden, especially 1960–1997. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, vol. 11, P. 55–69.
7. 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*. Fairbanks, Alaska, June 29 – July 3, 2008. pp. 551–556.
8. 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.
9. Dneprovskaya V.P., Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. Izmeneniye termokarsta v zone preryvistogo rasprostraneniya vechnoy merzloty Zapadnoy Sibiri na osnove kosmicheskikh snimkov [Study of thermokarst changes in zone of discontinuous permafrost of Western Siberia based on space images]. *Study of Earth from Space*, 2009, no. 4, pp. 88–96.
10. Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu. Imitatsionnoye modelirovaniye poley termokarstovykh ozer na territorii mnogoletney merzloty [Imitation modeling of thermokarst lakes fields in permafrost]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii*, 2011, no. 1, pp. 53–60.
11. Viktorov A.S. *Osnovnye problemy matematicheskoy morfologii landshafta* [Main problems of landscape mathematical morphology]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 252 p.
12. Kravtsova V.I. Rasprostraneniye termokarstovykh ozer v Rossii [Dissemination of thermokarst lakes in Russia]. *Vestnik of Moscow State University, Ser. Geography*, 2009, no. 3, pp. 33–42.
13. Kravtsova V.I., Bystrova A.G. Izmeneniye razmerov termokarstovykh ozer v razlichnykh rayonakh Rossii za poslednie 30 let [Changes of thermokarst lake areas in different regions of Russia for last three decades]. *Cryosphere of Earth*, 2009, vol. 13, no. 2, pp. 16–26.
14. *Atlas SSSR* [Atlas of the USSR]. Ed. by T.P. Sidorenkova. Moscow, GUGK SM USSR, 1984. 260 p.
15. *Landshaftnaya karta SSSR* [Landscape map of the USSR]. Ed. by I.S. Gudilin. Moscow, Moscow State University Press, 1987. Available at: http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/data/landscapes/ (accessed 19 November 2014).
16. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. *Geoimitatsionnoye modelirovaniye poley termokarstovykh ozer v zonakh merzloty* [Geoimitation modeling of thermokarst lakes fields in permafrost zones]. Khanty-Mansiysk, UIP USU publ., 2013. 129 p.
17. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6. In Book: *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems*. Ed. by O. Pokrovsky. NY, Nova Science Publishers, 2014. pp. 205–234. DOI: 10.978-94-007-4569-8.
18. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. Distanttsionnye issledovaniya izmenchivosti formy beregovykh granits termokarstovykh ozer na territorii vechnoy merzloty Zapadnoy Sibiri [Remote study of variability of coastal boundaries forms of thermokarst lakes in the permafrost of West Siberia]. *Study of Earth from Space*, 2012, no. 1, pp. 61–64.
19. Polishchuk V.Yu. Programmy kompleks imitatsionnogo modelirovaniya dinamiki poley termokarstovykh ozer v zonakh vechnoy merzloty [Program complex of simulating thermokarst lake fields dynamics in areas of permafrost]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2013, no. 1, pp. 125–128.
20. Audry S., Pokrovsky O.S., Shirokova L.S. Early diagenesis processes and their effect on organic matter mineralization and trace element post-depositional redistribution in Western Siberia thermokarst lakes. *Biogeosciences Discuss*, 2011, vol. 8, pp. 8845–8894. DOI: 10.5194/bgd-8-8845-2011.
21. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin C.N. Microbiologicheskie faktory, kontroliruyushchie tsikl ugleroda v termokarstovykh vodnykh obektakh Zapadnoy Sibiri [Microbiological factors, controlling carbon cycle in the water of thermokarst bodies of Western Siberia]. *Vestnik TGU. Biologiya*, 2012, no. 3, pp. 199–217.

Received: 21 November 2014.