*Криосфера Земли*, 2015, т. XIX, № 2, с. 114–120 **http://www.izdatgeo.ru**

УДК 528.8:551.345

# АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР В ЗОНЕ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

**Н.А. Брыксина[1], Ю.М. Полищук[2,3]**

[1] *Балтийский федеральный университет имени И. Канта, 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14, Россия; bryksina83@gmail.com*
[2] *Томский государственный университет, 634050, Томск, пр. Ленина, 36, Россия*
[3] *Институт химии нефти СО РАН, 634021, Томск, пр. Академический, 4, Россия; yupolishchuk@gmail.com*

Исследованы изменения численности термокарстовых озер на территории многолетней мерзлоты Западной Сибири с использованием разновременных космических снимков Landsat за период 1973–2013 гг. Выбрано более 30 тестовых участков, расположенных в разных зонах мерзлоты данной территории. На каждом тестовом участке определены от нескольких сотен до нескольких тысяч термокарстовых озер. Показано, что общее число вновь образовавшихся озер на рассматриваемой территории значительно превышает число исчезнувших (приблизительно в 20 раз). С увеличением географической широты количество исчезнувших за период исследований озер в среднем уменьшается, а вновь образовавшихся существенно увеличивается.

*Термокарстовые озера, глобальное потепление, разновременные космические снимки, многолетняя мерзлота, Западная Сибирь*

## ANALYSIS OF CHANGES IN THE NUMBER OF THERMOKARST LAKES IN PERMAFROST OF WEST SIBERIA ON THE BASIS OF SATELLITE IMAGES

**N.A. Bryksina[1], Yu.M. Polishchuk[2,3]**

[1] *Kant Baltic Federal University, 236041, Kaliningrad, Alexander Nevsky str., 14, Russia; bryksina83@gmail.com*
[2] *Tomsk State University, 634050, Tomsk, Lenina av., 36, Russia*
[3] *Institute of Petroleum Chemistry, SB RAS, 634021, Tomsk, Akademichesky av., 4, Russia; yupolishchuk@gmail.com*

Changes in the number of thermokarst lakes on the territory of West-Siberian permafrost were investigated using multi-temporal satellite images in the period of 1973–2013. Above 30 test sites located in different permafrost zones were selected. From several hundred to several thousand thermokarst lakes were determined at each test site. It has been demonstrated that the total number of formed lakes significantly exceeds the number of disappeared lakes (about 20 times). With the increasing geographical latitude, the number of disappeared lakes during the period of research decreases on average and the number of new formed lakes increases significantly.

*Thermokarst lakes, global warming, multitemporal satellite images, permafrost, West Siberia*

## ВВЕДЕНИЕ

Наблюдающееся в последние три-четыре десятилетия увеличение среднегодовой температуры земной поверхности приводит к деградации мерзлотных ландшафтов Северной Евразии. Наиболее чувствительными к температурным изменениям на территории многолетней мерзлоты оказываются термокарстовые озерные ландшафты [*Кравцова, Быстрова, 2009; Kirpotin et al., 2009*]. В связи с таянием многолетней мерзлоты термокарстовые озера возникают и развиваются за относительно короткое время (нескольких десятков лет) и также быстро могут исчезнуть, превратившись в хасыреи (котлованы осушенных озер). Однако период жизни некоторых древних термокарстовых озер может составлять от нескольких сотен до нескольких тысяч лет [*Hinkel et al., 2003*].

В настоящее время образование термокарстовых водоемов и депрессий в связи с деградацией многолетней мерзлоты на протяжении последних 50 лет наблюдается на Аляске, в Канаде и Европе [*Zuidhoff, Kolstrup, 2000; Luoto, Seppala, 2003; Riordan et al., 2006*]. Как показано в [*Кирпотин и др., 2008; Брыксина и др., 2011*], таяние мерзлоты в условиях современного потепления климата приводит к ускорению термокарстовых процессов и изменению площадей озер в зоне мерзлоты Западной Сибири. Однако ни в указанных работах, ни в других публикациях вопросы изменения количества термокарстовых озер в зоне мерзлоты не рассматривались.

Целью настоящей работы явилось дистанционное изучение изменений численности термокарс-

**© Н.А. Брыксина, Ю.М. Полищук, 2015**

товых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири в зависимости от геокриологического зонирования ее территории на основе анализа данных о количестве исчезнувших и вновь образовавшихся озер за 40-летний период исследований (1973–2013).

## КРИТЕРИИ ВЫБОРА ТЕСТОВЫХ УЧАСТКОВ И ОСОБЕННОСТИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР НА СНИМКАХ Landsat

Исследования изменения численности термокарстовых озер проводились с использованием разновременных космических снимков Landsat. Для исследований на территории Западной Сибири выбрано 33 тестовых участка (ТУ). При выборе ТУ необходимо было учитывать сложности определения термокарстовой природы озер по космическим снимкам. Известно [*Викторов, 2006*], что ландшафты озерных термокарстовых равнин формируются на слабоволнистой земной поверхности с характерной тундровой растительностью и вкраплением озер, как правило, округлой формы и беспорядочно разбросанных по территории.

Согласно [*Викторов, 2006*], образование термокарстовых озер происходит под воздействием нескольких факторов, главными из которых являются наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород (накопление критической мощности воды) и равнинный характер территории. Поэтому большинство исследователей озерных термокарстовых равнин исходят из предположения, что в районах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород криолитозоны расположены преимущественно озера термокарстового происхождения. Например, в работах В.И. Кравцовой с соавт. [*Кравцова, 2009; Кравцова, Быстрова, 2009; Кравцова, Тарасенко, 2010*] 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 на основе космических снимков, рассматриваются как термокарстовые озера.

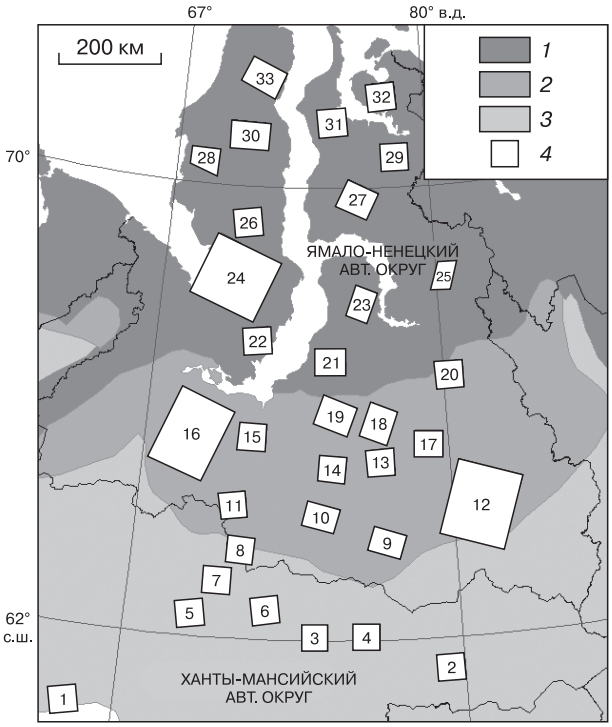


**Рис. 1. Карта-схема геокриологического зонирования территории мерзлоты Западной Сибири с обозначенными границами тестовых участков.**

Криолитозона: *1* – сплошная, *2* – прерывистая, *3* – островная; *4* – тестовые участки.

Выбор тестовых участков проводился с учетом специфики зонально-геокриологической дифференциации территории [*Атлас..., 1984*]. В каждой подзоне многолетней мерзлоты выбиралось по нескольку ТУ, что позволило исследовать динамику численности термокарстовых озер в зависимости от геокриологического зонирования территории. На рис. 1 представлена карта-схема расположения подзон многолетней мерзлоты Западной Сибири. Видно, что выбранные ТУ довольно равномерно распределены по территории исследований. Распределение ТУ по подзонам дано в табл. 1. В подзоне сплошной мерзлоты располагается 13 тестовых участков, в подзоне прерывистой мерзлоты – 12, а в подзоне островной – 8.

Для проведения дистанционных исследований было использовано 134 безоблачных разновременных снимка Landsat, полученных на рассматриваемую территорию в Западной Сибири. Все снимки отобраны из общедоступного архива Global Land Cover Facility и относятся к уровню обработки 1T, включающему радиометрическую и геометрическую коррекцию с использованием цифровых моделей рельефа. Включенные в коллекцию снимки Landsat имеют географическую привязку в проекции UTM. По времени съемки использованные космические снимки относятся к периоду 1973–2013 гг., причем около 90 % из них получены во второй половине летних сезонов (в основном в июле–августе), когда полностью исчезает ледовый покров озер, мешающий выделению их при автоматическом дешифрировании снимков.

Таблица 1. **Распределение тестовых участков по подзонам многолетней мерзлоты**

| Подзона мерзлоты | Количество ТУ | Номера ТУ |
|---|---|---|
| Сплошная | 13 | 21–33 |
| Прерывистая | 12 | 9–20 |
| Островная | 8 | 1–8 |

Обработка и дешифрирование космических снимков проводились с использованием программных средств современных геоинформационных систем (ГИС) ENVI 4.7 и ArcGIS 9.3. На каждом тестовом участке средствами ГИС были определены от нескольких сотен до нескольких тысяч озер. Общее количество исследованных озер на 33 тестовых участках Западной Сибири составило более 50 тысяч.

Для обоснования ландшафтной однородности территорий ТУ при формировании выборочных совокупностей термокарстовых озер проводилось сопоставление взаиморасположения выбранных участков и ландшафтных зон на исследуемой территории с использованием ландшафтной карты Западной Сибири [*Атлас..., 1971*]. Результаты этого сопоставления представлены в табл. 2. Расположение участков в пределах определенных ландшафтных зон может служить обоснованием однородности выборочных совокупностей озер по отдельным зонам мерзлоты, что является важным обстоятельством для интерпретации результатов дистанционных исследований изменений численности термокарстовых озер.

В результате дешифрирования разновременных космических снимков получены цифровые карты, отображающие расположение озер на каждом тестовом участке для конкретного года съемки. Исчезнувшие и вновь образовавшиеся в рассматриваемый период термокарстовые озера определялись путем сопоставления исходной (начальной) и конечной карт расположения озер на каждом тестовом участке. Для создания исходных карт использовались снимки Landsat-1 (1973 г.), Landsat-2 (1981 г.), Landsat-4 (1983, 1988 гг.), Landsat-5 (1984, 1987 гг.), а карты для конечного года исследования формировались по снимкам Landsat-8 за 2013 г. Снимки Landsat-1 за 1973 г. были использованы для создания исходных карт на 16 тестовых участках, а для остальных ТУ применены снимки Landsat с датами съемки в 1981–1988 гг. Использование снимков Landsat-8 съемки 2013 г. позволяет оценить изменение (уменьшение или увеличение) числа термокарстовых озер за достаточно длительный период времени (от 25 до 40 лет на разных ТУ).

Таблица 2. **Распределение тестовых участков по ландшафтным зонам**

| Ландшафтная зона (подзона) | Количество ТУ | Номера ТУ |
|---|---|---|
| Арктическая тундра | 3 | 31–33 |
| Субарктическая тундра | 10 | 21–30 |
| Лесотундра | 6 | 15–20 |
| Северная тайга | 11 | 4–14 |
| Средняя тайга | 3 | 1–3 |

Как следует из вышеизложенного, путем сопоставления исходной и конечной карт расположения озер на каждом тестовом участке выявлялись как исчезнувшие за период исследования термокарстовые озера, так и вновь образовавшиеся озера. Далее средствами ArcGIS 9.3 определялись центры исчезнувших и образовавшихся озер, удобные для картографического отображения их местоположения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Карта-схема расположения исчезнувших озер на исследуемой территории Западной Сибири приведена на рис. 2. Как видно на рис. 2, число исчезнувших озер в разных подзонах мерзлоты различно, причем наибольшая плотность этих озер наблюдается в прерывистой мерзлоте. Дистанционные измерения показывают, что общее количество исчезнувших озер на территории 33 тестовых участков, представляющих зону многолетней мерзлоты Западной Сибири, за период исследований было 391, общая площадь водной поверхности этих озер составила 14 826 га, средняя площадь исчезнувшего озера 37,9 га.

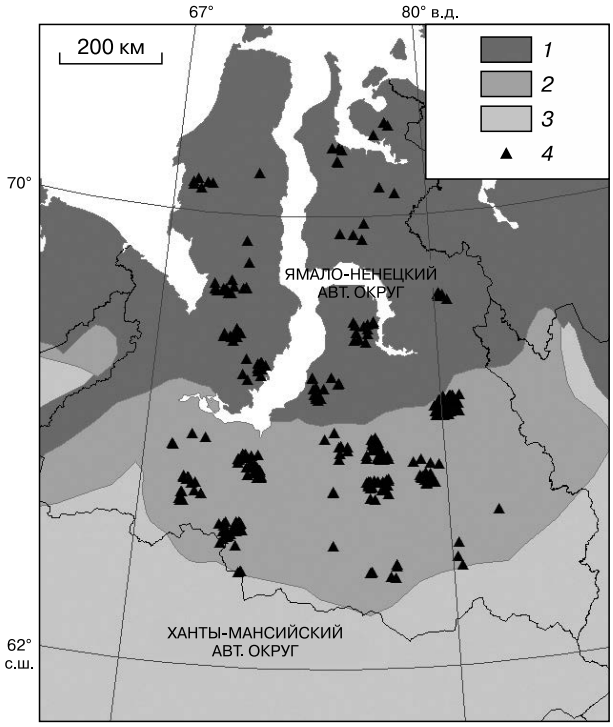


**Рис. 2. Карта-схема расположения центров исчезнувших озер в разных подзонах многолетней мерзлоты на территории Западной Сибири.**

Криолитозона: *1* – сплошная, *2* – прерывистая, *3* – островная; *4* – хасыреи.

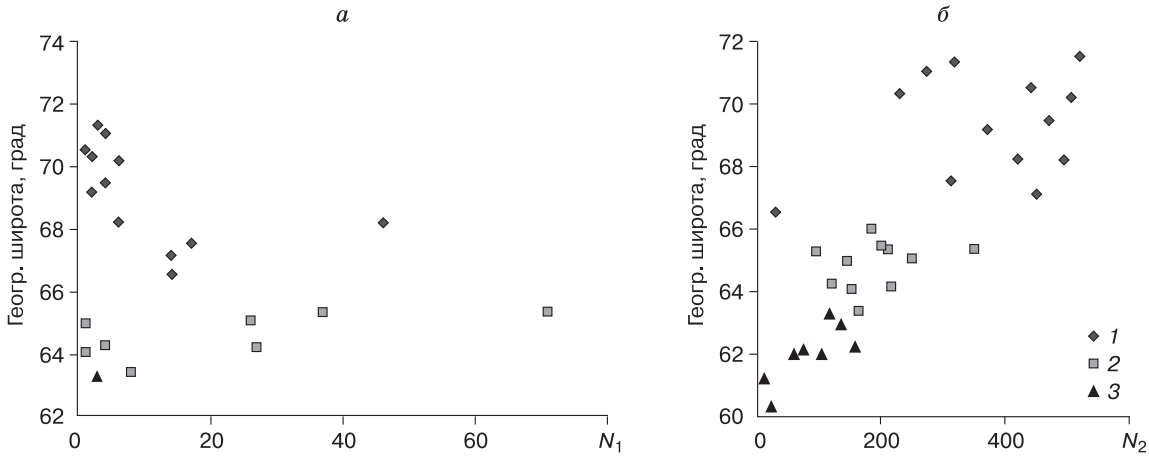


**Рис. 3. Зависимости количества исчезнувших озер $N_1$ (*а*) и вновь образовавшихся озер $N_2$ (*б*) от географической широты.**

Криолитозона: *1* – сплошная, *2* – прерывистая, *3* – островная.

Рассмотрим изменение количества исчезнувших озер в зависимости от географической широты их местоположения на исследуемой территории. На рис. 3, *а* приведена зависимость числа исчезнувших озер ($N_1$) от широты местоположения и от геокриологического зонирования. Отдельные точки на графике, отображаемые в виде треугольников, квадратов или ромбов в зависимости от их размещения в разных подзонах мерзлоты, показывают число исчезнувших озер на каждом тестовом участке. Как видно на рис. 3, *а*, число исчезнувших озер в среднем уменьшается по мере увеличения географической широты. При этом в подзоне сплошной мерзлоты оно существенно меньше, чем в прерывистой мерзлоте, т. е. наибольшее сокращение числа озер в криолитозоне Западной Сибири наблюдается преимущественно в подзоне прерывистой мерзлоты.

Анализ изменения численности и площади вновь образовавшихся озер на исследуемой территории показал, что количество этих озер за указанный период в зоне мерзлоты Западной Сибири равно 7751, а суммарная площадь их водной поверхности составила 13 649 га. Следовательно, средняя площадь вновь образовавшихся озер 1,76 га, что в 22 раза меньше средней площади исчезнувших озер.

На рис. 3, *б* приведена зависимость количества образовавшихся за период исследований озер ($N_2$) от географической широты местоположения тестовых участков. Как и на рис. 3, *а*, каждая точка на графике отображает число образовавшихся озер на отдельном ТУ. На рис. 3, *б* видно, что число вновь образовавшихся озер в среднем заметно увеличивается с ростом географической широты, а образование новых озер проявляется преимущественно в зоне сплошной мерзлоты. Из анализа графиков на рис. 3, *а*, *б* можно сделать вывод, что образование новых озер происходит в основном в подзоне сплошной мерзлоты, а исчезновение озер проявляется преимущественно в подзоне прерывистой мерзлоты.

Этот вывод количественно подтверждается и результатами сравнительного анализа изменений средних значений числа исчезнувших и вновь образовавшихся озер в разных подзонах мерзлоты. Средние значения, представленные в табл. 3, рассчитывались как среднеарифметические от количества озер, определенных на всех тестовых участках, находящихся в рассматриваемых подзонах. В табл. 3 приведены данные о диапазонах разброса численности исчезнувших и образовавшихся озер на территории рассматриваемых подзон мерзлоты, а также данные о суммарной площади всех тесто-

Таблица 3. **Изменение численности исчезнувших (ИО) и вновь образовавшихся (ВОО) озер в разных подзонах многолетней мерзлоты (1973–2013 гг.)**

| Подзона мерзлоты | Количество ИО | | Количество ВОО | | Общая площадь участков, км$^2$ | Общее число озер |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | сред. | диапазон | сред. | диапазон | | |
| Сплошная | 9,9 | 1–46 | 371,4 | 30–520 | 50 014 | 23 916 |
| Прерывистая | 22,4 | 1–71 | 186,4 | 95–350 | 64 010 | 18 441 |
| Островная | – | – | 85,8 | 12–158 | 20 452 | 7677 |

вых участков и общей численности озер в каждой подзоне.

Как следует из табл. 3, среднее количество исчезнувших озер в подзоне прерывистой мерзлоты более чем в 2 раза превышает соответствующую величину для подзоны сплошной мерзлоты. Согласно табл. 3, среднее число вновь образовавшихся озер в подзоне сплошной мерзлоты в 2 раза превышает количество образовавшихся озер в подзоне прерывистой мерзлоты. Следовательно, ускорение термокарстовых процессов в криолитозоне Западной Сибири под воздействием потепления климата вызывает значительно более интенсивное образование новых озер в подзоне сплошной мерзлоты, чем в подзоне прерывистой, а более интенсивное сокращение численности термокарстовых озер наблюдается в подзоне прерывистой мерзлоты по сравнению со сплошной.

Как показано в [*Днепровская и др., 2009; Кравцова, Быстрова, 2009; Polishchuk, Polishchuk, 2014; Polishchuk et al., 2014*], важной особенностью прерывистой криолитозоны Западной Сибири является сокращение суммарной площади термокарстовых озер, которое в работе [*Днепровская и др., 2009*] объясняется повышением среднегодовой температуры воздуха. Исследование взаимосвязи изменений площади озер и климатических характеристик на территории криолитозоны Западной Сибири на основе регрессионного анализа в [*Полищук, 2013*] подтверждает, что повышение среднегодовой температуры воздуха сопровождается сокращением площадей термокарстовых озер.

Так как исчезновение озера (образование хасырея на месте термокарстового озера) является завершающим этапом процесса сокращения площади водного зеркала озера, то и причины уменьшения численности озер те же, что вызывают сокращение размеров озер. В качестве возможных причин сокращения площадей озер в зоне прерывистой мерзлоты исследователи термокарста на Аляске [*Hinkel et al., 2003; Riordan et al., 2006*] называют почвенный дренаж в результате таяния многолетнемерзлых пород под влиянием потепления климата и уменьшение годовой суммы осадков.

По данным [*Днепровская, Полищук, 2007*], с повышением среднегодовой температуры воздуха приблизительно на 1 °С изменение количества атмосферных осадков на территории криолитозоны Западной Сибири за последние три десятилетия не превысило 1–2 %. Поэтому на территории мерзлоты Западной Сибири наиболее вероятной причиной сокращения размеров озер можно считать почвенный дренаж, приводящий к спуску озер.

Один из возможных механизмов спуска воды из термокарстового озера за счет почвенного дренажа при повышении температуры почвы описывается в работе [*Kirpotin et al., 2008*]. Как правило, крупные озера более старые и имеют более низкий уровень водной поверхности, чем окружающие сравнительно молодые озера. Это создает условия для спуска воды из мелких озер в более крупные путем почвенного дренажа при оттаивании почвы. В условиях потепления увеличивается глубина протаивания мерзлых грунтов в теплые сезоны, что ускоряет термоэрозионный спуск воды из озер и приводит как к сокращению площадей озер, так и к исчезновению их части.

Проведем сравнительный анализ представленных выше данных о численности исчезнувших и образовавшихся озер и их суммарных площадях на всей рассматриваемой территории криолитозоны Западной Сибири. Сопоставление этих данных приводит к установлению еще одной важной закономерности: при почти одинаковых величинах суммарных площадей исчезнувших (14 826 га) и образовавшихся (13 649 га) озер число вновь образовавшихся озер приблизительно в 18 раз превышает число исчезнувших. Следовательно, новые термокарстовые озера имеют существенно меньшие размеры, чем исчезающие. Можно предположить, что наблюдаемое ускорение термокарстовых процессов в результате потепления будет сопровождаться в криолитозоне Западной Сибири значительным ростом числа малых термокарстовых озер.

Согласно результатам экспериментальных исследований [*Audry et al., 2011; Pokrovsky et al., 2011*], малые термокарстовые озера Западной Сибири являются интенсивными природными источниками парниковых газов, в частности углекислого газа и метана. Поэтому обнаруженный в результате наших исследований преимущественный рост числа малых термокарстовых озер будет способствовать увеличению объемов накопления парниковых газов в атмосфере.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты исследования слабо изученных в настоящее время закономерностей изменения численности термокарстовых озер. Показано, что в криолитозоне Западной Сибири в последние три-четыре десятилетия наблюдаются два разнонаправленных процесса: исчезновение термокарстовых озер и образование новых озер.

Совместный анализ данных о суммарных площадях и численности исчезнувших и образовавшихся озер криолитозоны Западной Сибири показал, что при почти одинаковых величинах суммарных площадей исчезнувших и образовавшихся озер количество новых озер приблизительно в 18 раз превышает количество исчезнувших. Следовательно, вновь образовавшиеся термокарстовые озера должны иметь значительно меньшие размеры, чем исчезающие озера. Действительно,

среднее значение площади новых озер в 22 раза меньше соответствующей величины для исчезнувших озер. Поэтому можно предполагать, что наблюдаемое ускорение термокарстовых процессов в результате глобального потепления будет сопровождаться в криолитозоне Западной Сибири значительным ростом числа вновь образующихся малых термокарстовых озер.

Исследование изменений численности озер в зависимости от географической широты показывает, что по мере увеличения широты число исчезнувших озер в среднем уменьшается, а число вновь образовавшихся – увеличивается. Из анализа изменений численности озер по подзонам мерзлоты следует, что образование новых озер происходит в основном в подзоне сплошной мерзлоты, а исчезновение озер проявляется преимущественно в подзоне прерывистой мерзлоты.

Поэтому наиболее характерным процессом для прерывистой мерзлоты Западной Сибири является исчезновение озер. Названы возможные причины этого процесса. Исчезновение озера – это завершающий этап процесса сокращения площади водного зеркала озера, следовательно, и причины сокращения численности и уменьшения размеров озер одни и те же. В качестве одной из возможных причин сокращения площадей озер в зоне прерывистой мерзлоты в большинстве исследований термокарстовых процессов, в частности на Аляске [*Hinkel et al., 2003; Riordan et al., 2006*], указывается почвенный дренаж в результате таяния многолетнемерзлых пород под влиянием потепления климата. Поэтому наиболее вероятной причиной исчезновения термокарстовых озер в прерывистой мерзлоте авторы считают почвенный дренаж, приводящий к спуску озер. В условиях потепления со временем увеличивается глубина протаивания мерзлых грунтов в теплые сезоны, что ускоряет термоэрозионный спуск воды из озер и приводит к сокращению площадей и к исчезновению ряда озер.

Отмечаемое многими исследователями ускорение термокарстовых процессов под воздействием потепления климата вызывает более интенсивное образование новых озер, что является, согласно полученным результатам, наиболее характерным процессом для подзоны сплошной мерзлоты Западной Сибири. Как следует из вышеизложенного, вновь образующиеся термокарстовые озера имеют, как правило, малые размеры. По данным экспериментальных исследований [*Audry et al., 2011; Pokrovsky et al., 2011*], малые термокарстовые озера Западной Сибири являются интенсивными природными источниками метана. Поэтому можно предполагать увеличение эмиссии метана в атмосферу с ростом количества малых термокарстовых озер в криолитозоне, что будет способствовать усилению парникового эффекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-05-90742 мол_рф_нр) и ФЦП (грант 14.B25.310001 (BIO-GEO-CLIM)).

## Литература

**Атлас** СССР / Отв. ред. Т.П. Сидоренкова. М., ГУГК при СМ СССР, 1984, 260 с.

**Атлас** Тюменской области / Отв. ред. Л.А. Галкина. М.; Тюмень, ГУГК при СМ СССР, 1971, вып. 1, 216 с.

**Брыксина Н.А., Полищук В.Ю., Полищук Ю.М.** База данных по термокарстовым озерам Западной Сибири на основе космических снимков и возможности ее практического использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011, т. 8, № 3, с. 175–181.

**Викторов А.С.** Основные проблемы математической морфологии ландшафта / А.С. Викторов. М., Наука, 2006, 252 с.

**Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М.** Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исслед. Земли из космоса, 2009, № 4, с. 88–96.

**Днепровская В.П., Полищук Ю.М.** Исследование взаимосвязи климатического состояния и пространственной структуры растительного покрова в Западной Сибири // Вестн. ЮГУ, 2007, № 6, с. 31–38.

**Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А.** Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления // Вестн. ТГУ, 2008, № 311, с. 185–189.

**Кравцова В.И.** Распространение термокарстовых озер в России // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 2009, № 3, с. 33–42.

**Кравцова В.И., Быстрова А.Г.** Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 2, с. 16–26.

**Кравцова В.И., Тарасенко Т.В.** Изучение и картографирование динамики термокарстовых озер на территории Западной Сибири по разновременным космическим снимкам // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата, 2010, № 1, с. 82–87.

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

**Audry S., Pokrovsky O.S., Shirokova L.S. et al.** Early diagenesis processes and their effect on organic matter mineralization and trace element post-depositional redistribution in Western Siberia thermokarst lakes // Biogeosci. Discuss., 2011, vol. 8, p. 8845–8894.

**Hinkel K.M., Eisner W.R., Bockheim J.G. et al.** Spatial extent, age, and Carbon stoks in drained thaw lake Basins on the Barrow Peninsula // Alaska. Arctic, Antarctic, and Alpine Res., 2003, vol. 35, No. 3, p. 291–300.

**Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N.** Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting // Intern. J. Environ. Studies, 2009, vol. 66, No. 4, p. 423–431.

**Kirpotin S., Polishchuk Y., Zakharova E. et al.** One of the possible mechanisms of thermokarst lake drainage in West-Siberian North // Intern. J. Environ. Studies, 2008, vol. 65, No. 5, p. 631–635.

**Luoto M., Seppala M.** Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland // Permafrost and Periglacial Processes, 2003, vol. 14, p. 19–27.

**Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N. et al.** Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia // Biogeosciences, Spec. issue Siberian Arctic Land-Shelf-Atmosphere Interface, 2011, vol. 8, p. 565–583, doi:10.5194/bg-8-565-2011, p. 800–802.

**Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M.** Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Chapter 6 // Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems / O. Pokrovsky (ed.). N.Y., Nova Sci. Publ., 2014, p. 205–234, doi: 10. 978-94-007-4569-8.

**Polishchuk Yu., Kirpotin S., Bryksina N.** Remote study of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Chapter 5 // Ibid., p. 173–204, doi: 10. 978-94-007-4569-8.

**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. G04002, doi:10.1029/2005JG000150.

**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, p. 55–69.

*Поступила в редакцию*
*10 февраля 2014 г.*