

Дистанционное изучение ландшафтных и широтных особенностей динамики озер криолитозоны Восточной Сибири

Ю.М. Полищук^{1,3}, М.А. Куприянов¹, Н.А. Брыксина²

¹Югорский НИИ информационных технологий, г. Ханты-Мансийск 628011, Россия

²Балтийский Федеральный университет имени И. Канта

г. Калининград 236041, Россия

E-mail: bryksina83@gmail.com

³Институт химии нефти СО РАН, г. Томск 634021, Россия

E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Исследованы изменения размеров озер на территории многолетней мерзлоты Восточной Сибири с использованием разновременных космических снимков Landsat за период около трех десятилетий. Выбрано 14 тестовых участков, расположенных в подзоне сплошной мерзлоты и относящихся к разным ландшафтным зонам исследуемой территории. На каждом тестовом участке были определены от нескольких сотен до нескольких тысяч озер и измерены площади каждого из озер по космическим снимкам средствами геоинформационной системы ArcGIS 9.3. Изучение изменения суммарных площадей озер в зависимости от географической широты в зоне мерзлоты показало, что зона сплошного распространения мерзлоты Восточной Сибири условно может быть разделена на две широтные подзоны: северную и южную. Показано, что в криолитозоне Восточной Сибири диапазон широт вблизи значений 70° с. ш. является областью перехода от тренда сокращения в среднем площадей термокарстовых озер к тренду их роста в среднем при увеличении географической широты. В северной подзоне, расположенной на широтах более 70° с. ш., наблюдается в среднем рост суммарной площади озер, а в южной подзоне на широтах менее 70° с. ш. в среднем площади озер сокращаются. Проведен ландшафтный анализ данных об изменении площадей озер. Показано, что северная подзона сплошной криолитозоны Восточной Сибири включает лесотундру и субарктическую тундру, а южной подзоне мерзлоты соответствует таежная ландшафтная зона.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, глобальное потепление, разновременные космические снимки, тестовые участки, сплошная криолитозона, ландшафтный анализ, озерно-болотные ландшафты, субарктическая тундра, лесотундра, Восточная Сибирь.

Введение

Известно, что 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 озерно-болотные ландшафты (Викторов, 2006; Kirpotin et al., 2009; Кравцова, Быстрова, 2009). Известно, что перспективы хозяйственного освоения Восточной Сибири в ближайшие годы определяются планами добычи углеводородов в зоне многолетней мерзлоты на этой территории и транспортировки их на российский Дальний Восток, в Китай и другие страны Азиатско-Тихоокеанского региона. Строительство объектов инфраструктуры должно осуществляться с учетом знания об изменении состояния многолетнемерзлых грунтов на этой территории. В связи с труднодоступностью территорий многолетней мерзлоты как за рубежом, так и в нашей стране исследования изменений мерзлых ландшафтов проводятся с использованием дистанционных методов (Riordan et al., 2006; Днепровская и др., 2009; Кравцова, 2009).

Для дистанционного изучения геокриологических изменений на территориях многолетней мерзлоты по космическим снимкам в качестве индикаторов геокриологических изменений обычно используются озёра, которые хорошо дешифрируются на космических изображениях. Как показано в (Кирпотин и др., 2008; Riordan et al., 2006), таяние мерзлоты в условиях современного потепления климата приводит к ускорению термокарстовых процессов и деградации озерно-болотных ландшафтов, что проявляется в изменении площадей термокарстовых озер в зонах многолетней мерзлоты.

Дистанционные исследования динамики озер за период 1973-2010 гг, проведённые на территории Западной Сибири (Polishchuk et al., 2014), выявили явную зависимость изменения площадей озер от географической широты и ландшафтной структуры территории. Однако недостаточность количественных данных о площадях озер в зоне многолетней мерзлоты Восточной Сибири не позволяет исследовать закономерности геокриологических изменений в зависимости от географической широты и ландшафтных особенностей территории. В связи с этим целью настоящей работы явилось дистанционное изучение изменений площадей озер в криолитозоне Восточной Сибири в зависимости от географической широты и ландшафтного зонирования территории исследований.

Методические вопросы проведения дистанционных исследований

Согласно (Атлас СССР, 1984), почти 75% территории криолитозоны Восточной Сибири занимает подзона сплошного распространения мерзлоты, а на прерывистую и островную подзоны приходятся около 11 и 14% территории криолитозоны соответственно. Учитывая большую распространенность сплошной мерзлоты в Восточной Сибири, для проведения исследований выбрана именно подзона сплошного распространения мерзлоты на исследуемой территории.

В исследованиях использованы космические снимки Landsat, полученные за 30-летний период. В работе применялись метод разновременных космических снимков и метод тестовых участков. Для проведения этих исследований были использованы 14 тестовых участков, выбранных на территории подзоны сплошной мерзлоты в местах наиболее активного термокарста (Викторов, 2006), определяемых по большому скоплению озер, как правило, округлой формы и разных размеров и беспорядочно разбросанных по территории. Выбор тестовых участков (ТУ) проводился также с учетом наличия для каждого ТУ пар разновременных безоблачных снимков, относящихся к достаточно длительным интервалам времени.

На *рис. 1* показано размещение ТУ на исследуемой территории. Как видно на *рис. 1*, где показаны подзоны многолетней мерзлоты в соответствии с (Атлас СССР, 1984), все выбранные тестовые участки, располагающиеся на территориях Таймырского и Эвенкийского автономных округов и Якутии, находятся в подзоне сплошного распространения мерзлоты.

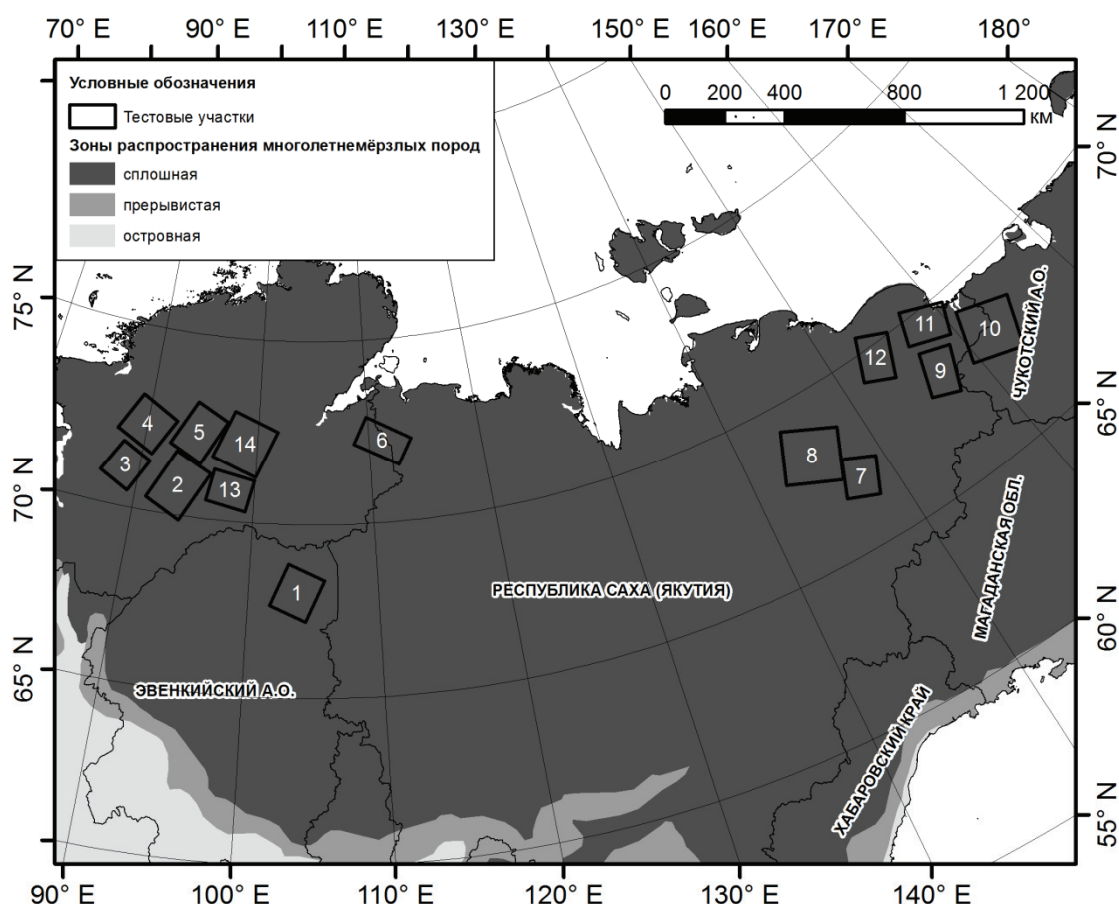


Рис. 1. Карта-схема расположения подзон многолетней мерзлоты на территории Восточной Сибири с обозначенными границами тестовых участков (Атлас СССР, 1984)

На *рис. 2* представлена карта-схема расположения ландшафтных зон на территории Восточной Сибири, на которой видно, что выбранные тестовые участки располагаются в разных ландшафтных зонах, что позволяет провести количественный анализ изменения площадей озер в зависимости от ландшафтного зонирования территории. Распределение тестовых участков по ландшафтным зонам дано в *табл. 1*, которая показывает, что наибольшее число тестовых участков располагается в зоне субарктической тундры, а наименьшее - в зоне лесотундры, общая площадь которой в пределах исследуемой территории значительно меньше площадей субарктической и таежной зон.

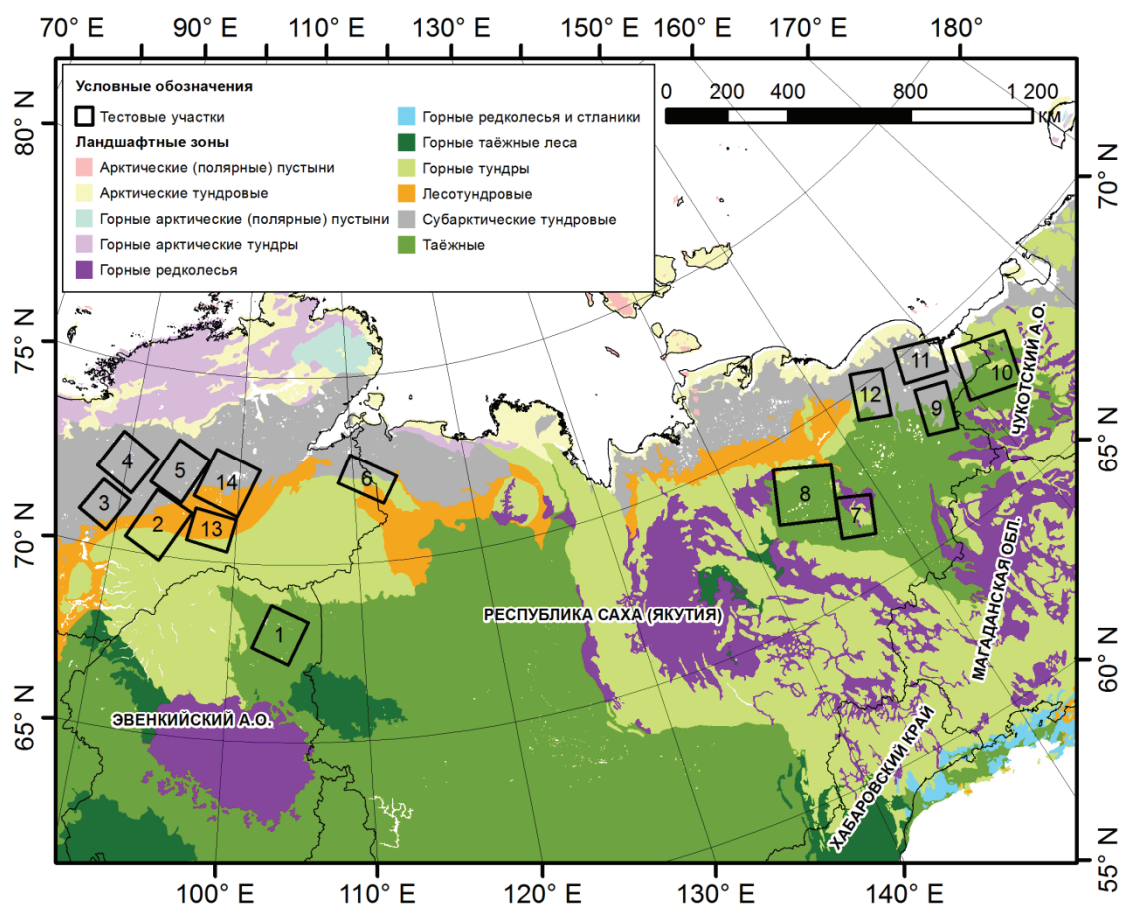


Рис. 2. Карта-схема ландшафтного районирования территории Восточной Сибири с обозначенными границами тестовых участков (Ландшафтная карта СССР, 1987)

Таблица 1. Распределение тестовых участков по ландшафтным зонам

Ландшафтные зоны	Количество ТУ	Номера ТУ
Субарктическая тундра	8	3-6, 9, 11, 12, 14
Лесотундра	2	2, 13
Тайга	4	1, 7, 8, 10

Для проведения дистанционных исследований были использованы разновременные снимки Landsat, полученные в период 1984-2013 гг. Все снимки отобраны из общедоступного архива «Global Land Cover Facility», имеют географическую привязку в проекции UTM и относятся к уровню обработки 1T, включающему радиометрическую и геометрическую коррекцию с использованием цифровых моделей рельефа.

Обработка космических изображений проведена с использованием программных средств ENVI 4.7 и ArcGIS 9.3. Классификация водных объектов на снимках Landsat проводилась способом двоичного кодирования (алгоритм Binary encoding classification в программном обеспечении ENVI 4.7). Площади озер определялись средствами ArcGIS 9.3.

На каждом тестовом участке были исследованы от нескольких сотен до нескольких тысяч озер.

На основе полученных данных о площадях озер был проведен количественный анализ изменения площадей термокарстовых озер во времени. Для этого на каждом из тестовых участков были рассчитаны суммарные площади озер в начальный и конечный годы наблюдений и определены абсолютные и относительные величины их изменения за период наблюдения (1984-2013 гг.). Величина относительного изменения суммарной площади определялась в соответствии с формулой:

$$R = (S_k - S_n) / S_n ,$$

где S_k и S_n - суммарная площадь озер на тестовом участке в конечный и начальный годы исследования соответственно.

Положительные значения R показывают увеличение суммарной площади озер, а отрицательные значения этой величины – сокращение площади озер. Нулевое значение R , означающее отсутствие изменений площадей озер за период наблюдений, показывает уравнивание двух тенденций изменения площадей, а именно роста суммарных площадей либо их сокращения.

Результаты исследования и их анализ

График относительного изменения суммарных площадей озер R в криолитозоне Восточной Сибири в зависимости от географической широты представлен на *рис. 3*, из которого видно, что на широтах более 70° с. ш. наблюдается в среднем рост суммарной площади озер, а на меньших широтах – сокращение площади озер. При этом в высоких широтах суммарная площадь озер увеличивается до 16 %, среднее значение R составляет 5,1 %. На широтах ниже 70° с. ш. суммарная площадь сокращается до 12 %, а среднее значение R составляет -2,5 %.

График на *рис. 3* показывает, что на широте около 70° с. ш. величина R принимает значение, близкое к нулю. Следовательно, можно считать, что в криолитозоне Восточной Сибири диапазон широт вблизи значений 70° с. ш. является областью перехода от тренда сокращения площадей термокарстовых озер к тренду их роста при увеличении географической широты.

Аналогичная закономерность выявлена (Polishchuk et al., 2014) в подзоне сплошной мерзлоты Западной Сибири, где также на широтах севернее 70° с. ш. обнаружено увеличение суммарной площади озер, а южнее этой широты наблюдается в среднем сокращение суммарной площади термокарстовых озер. По нашему мнению, это может служить

подтверждением достоверности полученных в настоящей работе результатов исследования закономерностей динамики озер в сплошной подзоне мерзлоты Восточной Сибири.

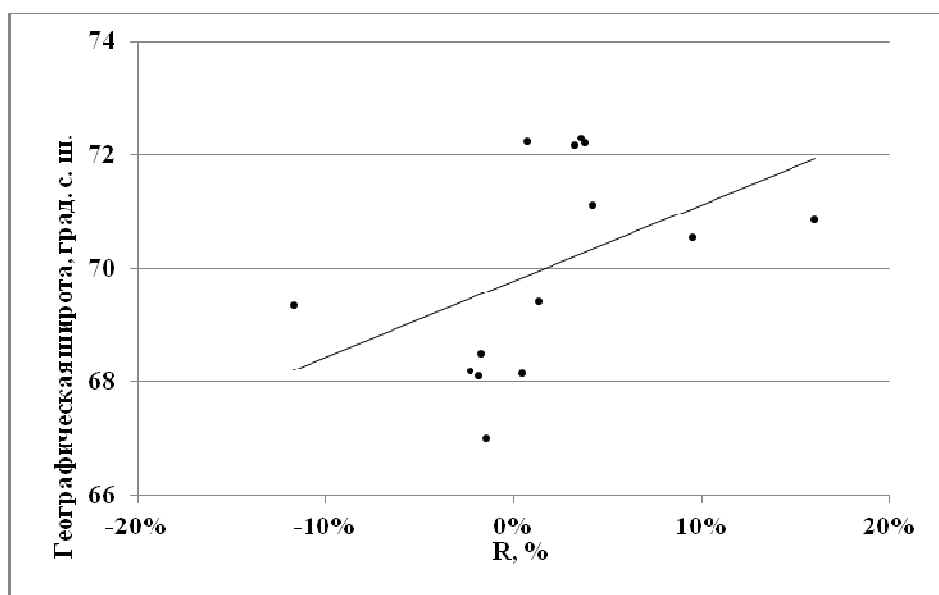


Рис. 3. Относительные величины изменения суммарной площади термокарстовых озер в зависимости от географической широты

Рассмотрим изменение величины R в зависимости от ландшафтного зонирования исследуемой территории. На рис. 4 представлены графики относительного изменения суммарной площади озер по ландшафтным зонам. Как можно заметить на графике на рис. 4, в субарктической зоне и в лесотундре наблюдается увеличение суммарной площади озер, причем в зоне лесотундры величина R более чем в 2 раза превышает ее значение для субарктической зоны. В таежной зоне, как видно на рис. 4, величина R , равная $-1,8\%$, показывает сокращение в среднем суммарной площади термокарстовых озер.

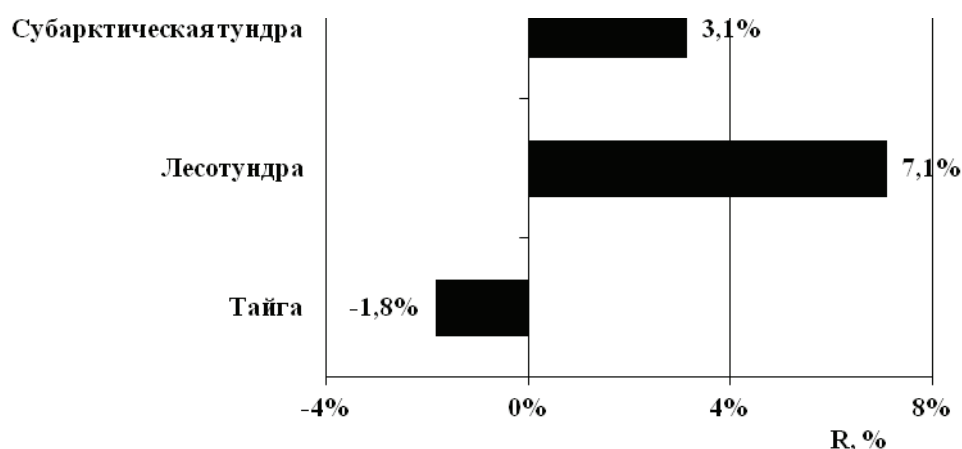


Рис. 4. Среднее значение относительного изменения суммарной площади озер в разных ландшафтных зонах

Следовательно, наиболее характерным свойством сплошной криолитозоны Восточной Сибири является проявление в таежной ландшафтной зоне тенденции сокращения суммарной площади термокарстовых озер, а в субарктической и лесотундровой зонах – тенденции роста суммарной площади озер. Эти закономерности динамики озер криолитозоны Восточной Сибири, обнаруженные дистанционными методами, вносят новый вклад в знания о многолетней мерзлоте. Однако вследствие ограничений дистанционных методов интерпретация полученных в статье результатов требует использование материалов наземных исследований.

Заключение

В статье представлены результаты дистанционных исследований слабо изученных до настоящего времени закономерностей изменения размеров озер криолитозоны Восточной Сибири в зависимости от географической широты и ландшафтного зонирования территории. Исследования проведены на 14 тестовых участках в зоне сплошного распространения мерзлоты по разновременным космическим снимкам Landsat, принятым за период последних трех десятилетий.

Изучение изменения суммарных площадей озер в зависимости от географической широты в зоне мерзлоты показало, что зона сплошного распространения мерзлоты Восточной Сибири условно может быть разделена на две широтные подзоны: северную и южную. В северной подзоне на широтах более 70 ° с. ш. наблюдается в среднем рост суммарной площади озер, а в южной подзоне на широтах менее 70 ° с. ш. – сокращение в среднем площади озер. Ландшафтный анализ данных об изменении суммарных площадей термокарстовых озер Восточной Сибири позволил установить, что указанная северная подзона включает лесотундру и субарктическую тундру, а южной подзоне мерзлоты соответствует таежная ландшафтная зона. Сформулированные в статье закономерности динамики озер криолитозоны Восточной Сибири вносят новый вклад в знания о многолетней мерзлоте.

Отметим, что результаты статьи основаны на анализе данных о площадях озер, полученных на сравнительно малом числе тестовых участков в разных ландшафтных зонах, что требует при проведении дальнейших исследований динамики озер криолитозоны Восточной Сибири привлечения новых тестовых участков в разных ландшафтных зонах исследуемой территории.

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 № 14-35-50521 мол_нр.

Литература

1. Атлас СССР / Отв. редактор Т.П. Сидоренкова. М., Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. 1984. 260 с.
2. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006, 252 с.
3. 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.
4. Кравцова В.И. Распространение термокарстовых озер в России // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. География. 2009. №3. С. 33–42
5. 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.
6. Ландшафтная карта СССР / Под редакцией И.С. Гудилина. М.: Моск. госуд. университет, 1987. [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/data/landscapes/.
7. 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.
8. Kirpotin S., Polishchuk Y., Zakharova E., Shirokova L., Pokrovsky O., Kolmakova M., Dupre B. One of the possible mechanisms of thermokarst lake drainage in West-Siberian North // International Journal of Environmental Studies. 2008. Vol. 65. No. 5. pp. 631–635.
9. Polishchuk Yu, Kirpotin S., and Bryksina N. Remote study of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Chapter 5 // In Book: Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems (Edited by O. Pokrovsky), NY: Nova Science Publishers. 2014. pp. 173-204. DOI 10. 978-94-007-4569-8.
10. 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.

Remote study of landscape and latitudinal peculiarities of lakes dynamics in cryolithozone of Eastern Siberia

Yu.M. Polishchuk^{1,3}, M.A. Kupriyanov¹, and N.A. Bryksina²

¹*Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk 628011, Russia*

E-mail: yupolishchuk@gmail.com

²*Kant Baltic Federal University, Kaliningrad 236041, Russia*

E-mail: bryksina83@gmail.com

³*Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, Tomsk 634021, Russia*

E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Changes of lakes sizes in the Eastern Siberia permafrost was studied using multi-temporal Landsat satellite images over a period of about three decades. The studied 14 test sites are located in the subzone of continuous permafrost and related to different landscape zones of territory. From several hundred to several thousand lakes were determined at each test site and were measured the lakes' areas on satellite images by means of a geographic information system ArcGIS 9.3. Study of changes in the total area of the lake, depending on the latitude zone of permafrost showed that the zone of continuous permafrost in Eastern Siberia can be conditionally divided into two latitudinal subzones: northern and southern subzones. It is shown that in the permafrost zone of Eastern Siberia the range of latitudes of values near 70° N is an area of transition from the trend of reduction of lakes' sizes to the trend of growth of sizes in the average with increasing latitude. In the northern subzone which is located at latitudes greater than 70° N, the average growth of the total area of lakes is observed. In the southern subzone at latitudes less than 70° N, a total area of lakes is reduced on the average. A landscape analysis of data on changing areas of thermokarst lakes was carried out. It is shown that the northern subzone of continuous permafrost zones of Eastern Siberia includes forest-tundra and subarctic tundra and southern subzone corresponds to taiga zone.

Keywords: permafrost, global warming, nonsimultaneous satellite images, test sites, continuous cryolithozone, landscape analysis, lake-marsh landscape, subarctic tundra, forest-tundra, Eastern Siberia.

References

1. *Atlas SSSR* (Atlas of USSR) / Edited by T.P. Sidorenkova. Moscow: GUGK SM USSR, 1984, 260 p.
2. Viktorov A.S. *Osnovnye problemy matematicheskoi morfologii landshafta* (Main problems of landscape mathematical morphology). Moscow: Nauka, 2006, 252 p.
3. Dneprovskaya V.P., Bryksina N.A., Polishchuk Y.M. Izucheniye izmeneniy termokarsta v zone preryvistogo rasprostraneniya vечноy merzloty Zapadnoy Sibiri na osnove kosmicheskikh snimkov (Study of thermokarst changes in zone of discontinuous permafrost of Western Siberia based on space images). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 4, pp. 88-96.
4. 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.
5. Kravtsova V.I., Bystrova A.G. Izmeneniye razmerov termokarstovykh ozer v razlichnykh raionakh 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.
6. http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/data/landscapes/.
7. 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.
8. Kirpotin S., Polishchuk Y., Zakharova E., Shirokova L., Pokrovsky O., Kolmakova M., Dupre B. One of the possible mechanisms of thermokarst lake drainage in West-Siberian North, *International Journal of Environmental Studies*, 2008, Vol. 65, No. 5, pp. 631-635.
9. Polishchuk Yu, Kirpotin S., Bryksina N. Remote study of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Chapter 5 , In: *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems* (Edited by O. Pokrovsky), NY: Nova Science Publishers, 2014, pp. 173-204, doi: 10. 978-94-007-4569-8.
10. 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.