

Изучение динамики термокарстовых процессов на севере Западной Сибири с использованием космических снимков и наземных данных

Н.А. Брыксина¹, С.Н. Кирпотин², Ю.М. Полищук^{3,4}

¹Югорский НИИ информационных технологий, г. Ханты-Мансийск, pna@uriit.ru

²Томский государственный университет, г. Томск, kirp@ums.tsu.ru

³Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, yu_polischuk@ugrasu.ru

⁴Институт химии нефти СО РАН, г. Томск

Рассмотрены вопросы применения данных дистанционного зондирования для изучения динамики термокарстовых процессов на территории вечной мерзлоты Западной Сибири. Сформирована коллекция разновременных снимков Landsat, Meteor-3M и ERS-2 за период с 1973 по 2006 г. Изучена зависимость величины относительных изменений суммарной площади термокарстовых озер от географической широты расположения тестовых участков. Показано, что в зоне сплошной мерзлоты наблюдается в среднем увеличение площадей термокарстовых озер, а в зоне прерывистой мерзлоты площади термокарстовых озер в среднем сокращаются.

Ключевые слова: термокарст, термокарстовые озера, вечная мерзлота, космические снимки, радарные космические снимки, глобальное потепление.

Введение

Северная территория Западной Сибири располагается в зонах сплошной и прерывистой вечной мерзлоты. В связи с глобальным потеплением климата в последние годы значительно ускорились процессы таяния вечной мерзлоты, что приводит к уменьшению прочности многолетнемерзлых пород [1]. Известно, что большинство газовых месторождений и значительная часть месторождений нефти России располагаются в зоне вечной мерзлоты Западной Сибири [2]. И снижение прочности многолетнемерзлых пород под воздействием потепления климата будет сопровождаться ростом аварийности на объектах нефтегазового комплекса [3], вызывая рост экономических и экологических ущербов. В связи с этим несомненно, что изучение изменений криогенного состояния мерзлотных ландшафтов в условиях изменения климата является актуальной проблемой, решение которой ввиду труднодоступности северных территорий Сибири невозможно без использования методов дистанционного зондирования земной поверхности.

Термокарстовые озера, образующиеся в результате просадки земной поверхности из-за протаивания ископаемого льда и мерзлых пород [4], в отличие от озер других типов (ледниковых, карстовых и др.) имеют небольшую глубину (до 1-2 м) и округлую (часто овальную) форму. Со временем термокарстовые озера, сокращаясь, превращаются в днища термокарстовых котловин хасыреи. Хасыреи представляют собой заторфованные котловины спущенных термокарстовых озер [5] с сочетанием травяно-сфагново-кустарничковых болот, мелких озерков и формирующихся бугров пучения. Термокарстовые озера и хасыреи хорошо дешифрируются на космических снимках и являются наиболее пригодными геоморфологическими индикаторами климатических изменений, что позволяет использовать дистанционные методы при проведении геокриологических исследований. Целью настоящей работы является изучение динамики термокарстовых процессов в зоне вечной мерзлоты Западной Сибири на основе анализа закономерностей изменений площадей термокарстовых озер с использованием космических снимков.

Исследование особенностей изменения площадей термокарстовых озер на основе космических снимков и данных наземных наблюдений

При наземных исследованиях плоскобугристых торфяных болот, которые проводились в летний период прошлого года на территории Ямало-Ненецкого автономного округа, была выбрана для исследований группа термокарстовых озер в районе поселка Пангоды в междуречье Тыйяха и Правой Хетты. В выбранной группе озер было одно «большое» озеро, рядом с которым находилось маленькое подковообразное озерцо, из которого вода перетекала в большое озеро. Сток воды из малого озера в большое стал дополнительным источником стремительного увеличения площади последнего.

Заметим, что в других случаях озера исследуемой территории тоже расширяют свои площади, хотя и не имеют явного стока из соседних более мелких озер. Дело в том, что крупные озера дренируют всю прилегающую к ним площадь, находясь на более низких высотных отметках. В них стекают по водотокам и надмерзлотные воды за счет постепенного оттаивания соседних мерзлых плоскобугристых болот в летнее время. Таким образом, не только озера отдают воду друг другу, но и постепенно оттаивающая на протяжении лета мерзлота прилегающих к ним болот. Этот фактор действует постоянно, на протяжении всего короткого летнего периода. Крупные озера работают как водосборные воронки (локальные базисы эрозии). Поэтому перетекание воды из соседних озер хотя и впечатляющий, но не единственный источник пополнения крупных озер. На каждом участке, где есть крупное озеро, оно работает как некая бессточная котловина (подобно бессточным котловинам озер в Монголии), поскольку крупное озеро, протаивая подстилающие грунты, всегда находится на более низких отметках по отношению к окружающему его кластеру мелких озер, а весь избыток (излишек) воды, поступающей, например, во время затяжных дождей, сбрасывается в гидросеть.

Для подтверждения результатов визуального наблюдения на участок местности междуречья Тыйяха и Правой Хетты были подобраны серии космоснимков, полученных в оптическом и радиолокационном диапазонах с КА Landsat (годы съемки: 1984, 1989, 2001) и ERS-2 (2005 и 2007 гг.). Результаты площадных измерений центрального озера по двум космоснимкам Landsat-5 (1984) и ERS-2 (2007) показали его увеличение на 11% с 1984 года. Изменение площади термокарстового озера в промежуточные годы по отношению к площади на снимке 2007 года составило 7% в 1989 г. и 4% в 2005 г.

На рис. 1 приведены фрагменты космоснимков Landsat-5 (1984) и ERS-2 (2007) обсуждаемой выше группы термокарстовых озер. По снимку 2007 года (рис. 1б) были определены границы большого озера, показанные белым контуром, который был перенесен на рис. 1а. В границах белого контура (рис. 1а) прослеживаются светлые участки безводной поверхности, что подтверждает увеличение площади озера к 2007 г. На этом же рис. 1а визуально можно также заметить под большим озером маленькое озерцо в виде подковы, отмеченное для наглядности указательной стрелкой. На рис. 1б это маленькое озеро значительно уменьшилось в размерах и едва заметно на снимке. Естественно предположить, что именно это малое озеро стало источником пополнения воды в большом озере.

Исследование внутрисезонной динамики площадей термокарстовых озер

Под сезонной динамикой термокарстовых озер здесь понимается изменение площадей термокарстовых озер в бесснежный период (с июня по сентябрь) в пределах одного года. Эти исследования необходимы для оценки возможного влияния внутрисезонных изменений площадей озер на статистические характеристики долговременных изменений площадей озер, рассчитанных на основе измерений площадей озер по разновременным космическим снимкам за длительный промежуток времени исследования, например, за 2-3 десятилетия. Для проведения этих исследований было выбрано три тестовых участка (ТУ), расположенных в сплошной и прерывистой зонах вечной мерзлоты Западной Сибири (рис. 2).

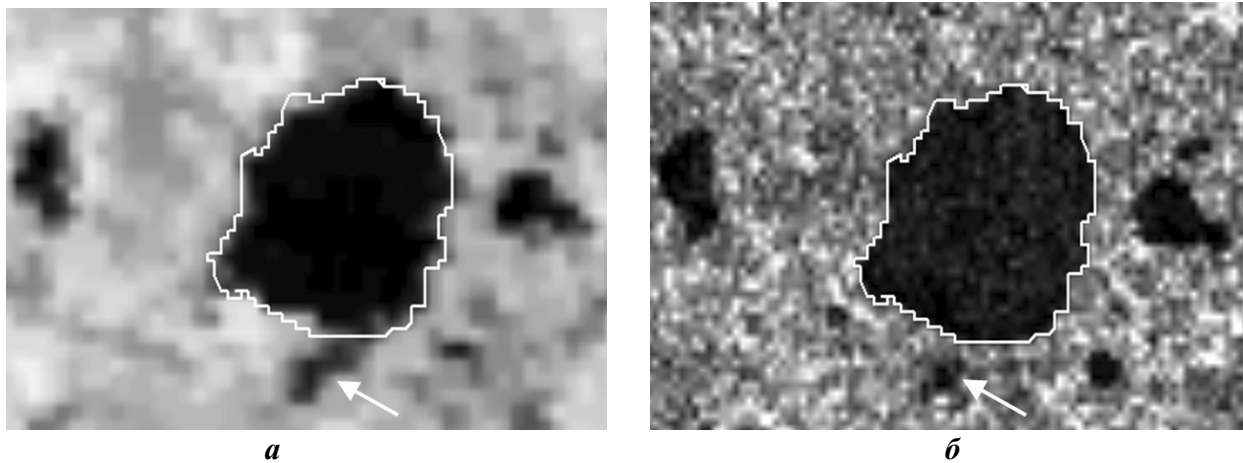


Рис. 1. Фрагменты космических снимков исследуемой группы термокарстовых озер.
Обозначения: а – Landsat-5 (1984); б – ERS-2 (2007)

На каждом из ТУ выбиралось по 60 наиболее крупных озер площадью не менее 20 га. Анализ внутрисезонной динамики термокарстовых озер проводился путем измерения площадей водных поверхностей озер на разновременных космических снимках с использованием ERDAS Imagine 9.1. Определение площадей озер проводилось путем выделения их границ с помощью инструмента Create Polygon AOI.

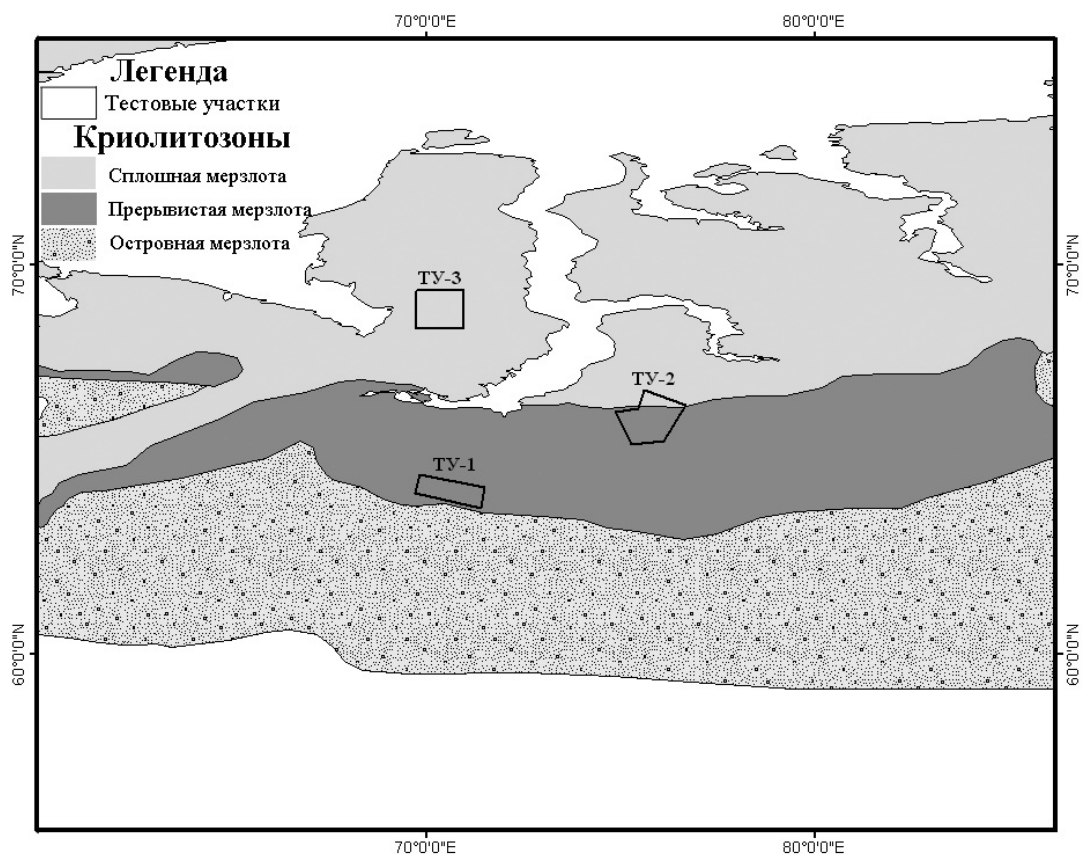


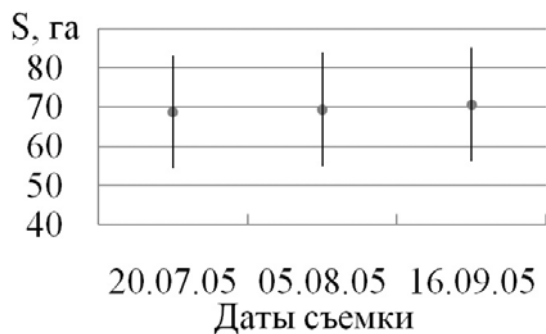
Рис. 2. Карта-схема расположения зон вечной мерзлоты на территории Западной Сибири с обозначенными границами тестовых участков

Из-за отсутствия безоблачных оптических снимков на северные территории Западной Сибири в теплый период для проведения исследований внутрисезонных изменений площадей термокарстовых озер были использованы радиолокационные космические снимки, на которые

облачность не оказывает влияния. Перечень использованных в исследовании радиолокационных космических снимков ERS-2 приведен в табл. 1.

Таблица 1. Время съемки использованных в работе космических снимков ERS-2

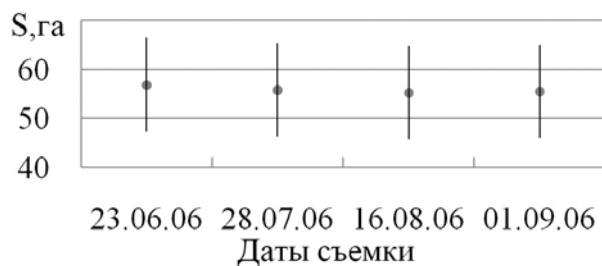
Даты съемки	Тестовые участки		
	ТУ-1	ТУ-5	ТУ-8
2005	июль, август, сентябрь	июль, август, сентябрь	июнь, июль, август, сентябрь
2006		июнь, июль, август, сентябрь	июнь, июль, август



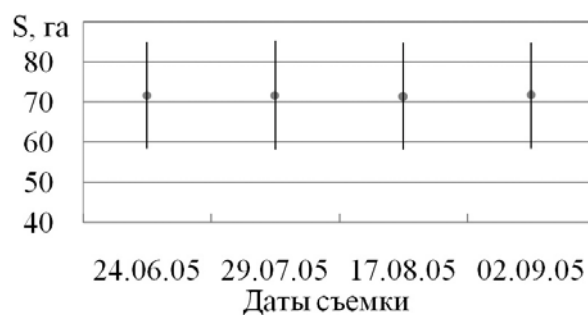
а



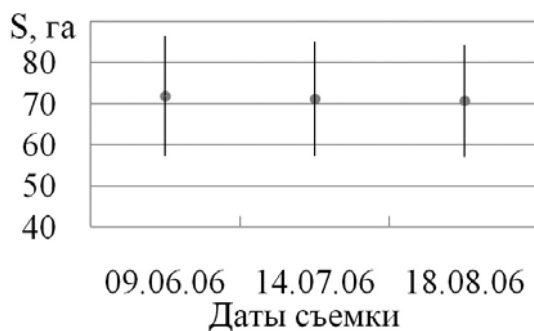
б



в



г



д

Рис. 3. Средние значения площади термокарстовых озер на разных тестовых участках. Обозначения: а – ТУ-1; б и в – ТУ-2; г и д – ТУ-3

Для изучения внутрисезонных изменений площадей озер по результатам спутниковых измерений площадей термокарстовых озер были рассчитаны средние значения площади озер на

каждом тестовом участке (\bar{X}) и доверительные интервалы для них (I), рассчитанные для доверительной вероятности 95 % по следующей формуле:

$$I/2 = \bar{X} \pm 1,67 \sigma / \sqrt{n},$$

где σ - среднее квадратическое отклонение измеренных величин площадей озер,

n – объем выборки (число озер на каждом ТУ).

На рис. 3 представлены графики внутрисезонных изменений средних площадей озер на исследованных территориях. Точками на графиках обозначены средние значения площадей на каждом ТУ, отрезками прямых линий показаны доверительные интервалы. Как видно из приведенных на рис. 3 графиков, в пределах летних сезонов каждого года на всех тестовых участках в теплые периоды года с мая по сентябрь отклонения средних значений площадей озер от их среднесезонных значений незначительны.

Для количественной оценки внутрисезонных изменений площадей озер на каждом из тестовых участков были рассчитаны среднесезонные значения отклонений площадей озер (M) для каждого года и абсолютные (Δ) и относительные (δ) величины отклонений средних значений площадей озер, взятых в отдельные месяцы одного сезона, от их среднесезонных значений. Результаты этих расчетов приведены в таблице 2, где обозначено:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{X}_i}{m},$$

\bar{X}_i - среднее значение площади озер в i –ый месяц одного года,

m – число месяцев, использованных для исследований в каждый сезон согласно табл. 1.

Таблица 2. Статистика внутрисезонных изменений площадей озер

Статистические характеристики	ТУ-1	ТУ-5		ТУ-8	
	2005	2005	2006	2005	2006
M, га	69,6	57,5	55,8	71,6	71,2
Δ , га	1,9	0,9	1,6	0,4	1,1
$d = \Delta/M, \%$	2,7%	1,6%	2,9%	0,6%	1,5%

Как видно из табл. 2, относительные величины отклонения средних значений площадей термокарстовых озер для разных ТУ изменяются в пределах от 0,6 до 2,9 %. Относительное изменение средних значений площадей озер, усредненное по всем тестовым участкам, составляет около 2%. Это позволяет сделать вывод о том, что в среднем внутрисезонные изменения площадей термокарстовых озер незначительны и не могут оказать существенного влияния на результаты исследования многолетней динамики площадей озер в зоне вечной мерзлоты.

Исследование многолетней динамики площадей термокарстовых озер

Для исследования многолетней динамики площадей термокарстовых озер были выбраны 11 тестовых участков в разных зонах вечной мерзлоты Западной Сибири. На рис.4 показана карта-схема геокриологического зонирования северной части Западной Сибири, созданная на основе [6, 7], с обозначенными номерами тестовых участков. Согласно рис. 4, тестовые участки с номерами с 1 по 6 выбраны в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты. Тестовые участки с номерами с 7 по 11 располагаются в зоне сплошной вечной мерзлоты.

На каждый тестовый участок подбирались разновременные космические снимки с 1973 по 2006 г. В период с 1973 по 2001 г. были использованы космические снимки

Landsat - 1, 4, 5, 7, а с 2005 по 2006 г. – космические снимки Метеор -3М и радарные снимки ERS-2. На каждом ТУ были выбраны по 40 наиболее крупных (более 20 га.) термокарстовых озер, площади которых измерялись в ERDAS IMAGINE 9.1.

По результатам измерений площадей на каждом тестовом участке были рассчитаны: суммарные площади термокарстовых озер, абсолютные и относительные величины изменений суммарной площади озер за период исследования. Величина относительного изменения площадей рассчитывалась путем деления величины абсолютного изменения на суммарную площадь озер, определенную по снимкам начального года исследования.

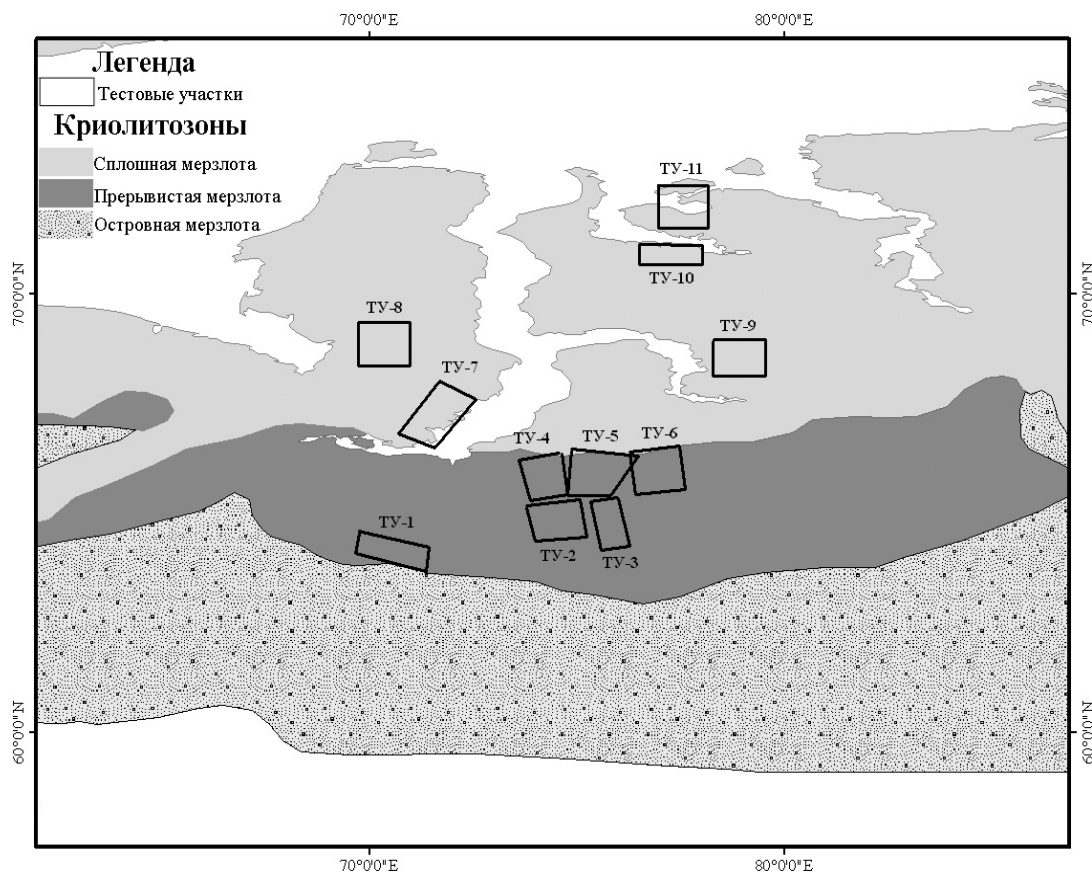


Рис. 4. Карта-схема расположения тестовых участков на территории сплошной и прерывистой зон вечной мерзлоты Западной Сибири

Таблица 3. Изменение суммарной площади термокарстовых озер в прерывистой и сплошной зонах распространения многолетнемерзлых пород

Номер ТУ	Общая площадь озёр, га						$\sum S$	R, %
	1973	1984	1988	2001	2005	2006		
1	2155,1		1902,2		1685,5		-469,6	-22
2		3673,2		3427,5	3234,8		-438,4	-12
3			2664,1	2561,1	2644,7		-19,4	-1
4			3777,0	2887,1	2921,7		-855,3	-23
5		3165,7		2892,4			-273,3	-9
6	3864,2			2652,4	2759,6		-1104,6	-29
7	2374,5		2651,3			2621,2	246,7	10
8	1899,1					2035,0	135,9	7
9	3566,9			3979,1		3998,9	432,0	12
10	3421,2			3739,1		3765,3	344,1	10
11	3463,5	3711,0		3641,3		3761,0	297,5	9

В табл. 3, где приведены результаты статистической обработки данных спутниковым измерений площадей термокарстовых озер, приняты следующие обозначения:

$\sum S$ – абсолютное изменение суммарной площади термокарстовых озер,

R - относительное изменение суммарной площади термокарстовых озер.

На рис. 5 представлен график зависимости величины относительных изменений суммарной площади термокарстовых озер от географической широты расположения тестовых участков, построенный на основе данных табл. 3. Как видно из рис. 5, на широтах выше 67° с. ш. (зона сплошной вечной мерзлоты) наблюдается увеличение площадей термокарстовых озер. На широтах 66° с. ш. и ниже (зона прерывистой вечной мерзлоты) площади термокарстовых озер значительно сокращаются. Сравнение рис. 4 и 5 показывает, что изменение характера геокриологических процессов (переход от сокращения площадей озер к их росту) наблюдается в интервале широт 66° - 67° с. ш., приблизительно совпадающем с границей зон сплошного и прерывистого типов распространения многолетнемерзлых пород.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 08-05-92496 НЦНИЛ_а).

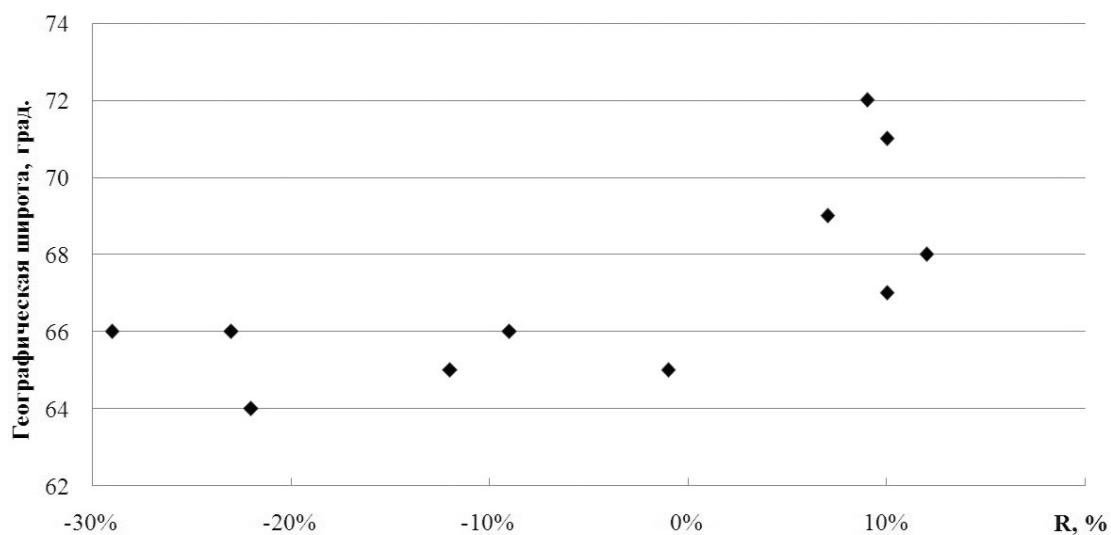


Рис. 5. Относительные значения термокарстовых озер в зависимости от широты

Заключение

В качестве объектов исследования в работе были использованы термокарстовые озера, хорошо различимые на космических снимках и являющиеся удобным индикатором изменений ландшафтов. Проведенный совместный анализ результатов наземных наблюдений и данных дистанционного зондирования позволил установить, что одним из основных механизмов изменения площадей термокарстовых озер на территории вечной мерзлоты является спуск воды из малых в большие озера в результате протаивания многолетнемерзлых грунтов. Выбрана совокупность тестовых участков на территории вечной мерзлоты Западной Сибири, позволяющая исследовать особенность динамики термокарстовых процессов в зонах сплошного и прерывистого распространения мерзлоты Западной Сибири. Сформированная за период с 1973 по 2006 г. коллекция разновременных снимков Landsat, Метеор -3М и ERS-2 использована для проведения исследований внутрисезонной и многолетней динамики термокарста. На каждом из тестовых участков были выбраны по 40 - 60 наиболее крупных (площадью более 20 га) термокарстовых озер, площади которых измерялись с помощью программных средств ERDAS

IMAGINE 9.1. Изучена зависимость величины относительных изменений суммарной площади термокарстовых озер от географической широты расположения тестовых участков. Показано, что в зоне сплошной мерзлоты наблюдается в среднем увеличение площадей термокарстовых озер, а в зоне прерывистой мерзлоты площади термокарстовых озер в среднем сокращаются. Полученные результаты могут быть использованы для оценки возможных последствий деградации вечной мерзлоты Западной Сибири в условиях глобального потепления.

Литература

1. Павлов А.В., Ананьева Г.В. Оценка современных изменений температур воздуха на территории криолитозоны России // Криосфера Земли, 2004. Т. 8. № 2. С. 3–9.
2. Полищук Ю.М., Яценко И.Г. Сравнительный анализ химического состава нефтей России на территории вечной мерзлоты и вне ее // Криосфера Земли, 2007. Т. 11. № 1. С. 45–51.
3. Samsonov R., Lesnykh V., Polishchuk Yu. and Bryksina N. The climate change impact on thermokarst in West-Siberian territory and geological risks in gas industry / Proc. of 14th annual conference of TIEMS (June 5-8, 2007, Split, Croatia). – Split: TIEMS, 2007. pp. 212 – 216.
4. Кирпотин С.Н. Западная Сибирь – уникальный болотный регион и ее роль в регулировании глобального климата // Актуальные проблемы экологии и природопользования Сибири в глобальном контексте: сборник статей / под. ред. С.Н. Кирпотина. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. С. 22-42.
5. Kirpotin S.N. 2006. La Sibérie occidentale: la région unique paludéenne et sa signification pour le réglage du climat global // Les problèmes actuels d'écologie et de gestion de la nature de la Sibérie dans le contexte global: Le recueil des articles en deux parties. Première partie / Sous la direction de S.N. Kirpotin. Tomsk: NTL. 22-42.
6. Атлас СССР / Отв. редактор Т.П. Сидоренкова. – М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1984. – 260 с.
7. Melnikov V.P., Drozdov D.S. Distribution of Permafrost in Russia // Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide. - NATO Science Series IV. – 2006. - Vol. 65. – p. 69 – 80.

Study of thermokarst processes dynamics in the Northern part of Western Siberia using space images and field data

N.A. Bryksina¹, S.N. Kirpotin², Y.M. Polishchyuk^{3,4}

¹Ugra Research Institute for Information Technologies, Khanty-Mansjisk

²Tomsk State University, Tomsk

³Ugra State University, Khanty-Mansjisk

⁴Institute of Petroleum Chemistry, SB RAS

Problems of remote sensing data use are considered for study of thermokarst processes dynamics in territory of West-Siberian permafrost. Collection of nonsimultaneous space images Lansat, Meteor-3M and ERS-2 is formed for period from 1973 to 2007 yrs. Dependence of relative changes of summarized area of thermokarst lakes on latitude of test territories location is studied. It is shown that thermokarst lakes areas on average increase in continuous permafrost and on average decrease in discontinuous permafrost.

Keywords: thermokarst, thermokarst lake, permafrost, space image, radar space image, global warming.