

ИЗУЧЕНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

В.И. Кравцова, Т.В. Тарасенко

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

manunya_geo@mail.ru, tarasenko_tanya@list.ru

Изучением динамики термокарстовых озер по разновременным космическим снимкам в связи с климатическими изменениями занимаются исследователи России, Канады, США. При сопоставлении их результатов на территории Западной Сибири выявляются существенные различия. В связи с этим выполнено детальное исследование с использованием разных методик для уточнения характера изменений площадей термокарстовых озер. В зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) было выявлено уменьшение и исчезновение некоторых озер, а в зоне прерывистого распространения ММП наблюдаются лишь единичные примеры ступенчатых озер.

Ключевые слова: термокарстовые озера, разновременные космические снимки

Введение

В последнее время исследователи уделяют много внимания проблеме глобального потепления климата. Территория Западной Сибири относится к районам значительного потепления, повышение температуры воздуха в 2000 году относительно 1950-х годов составило здесь 0,7 – 0,8 °С [Павлов и Ананьева, 2004].

Существует мнение, что потепление может существенно повлиять на распространение многолетней мерзлоты. Часть исследователей считает, что продолжение потепления климата в XXI веке может привести к опасным геоэкологическим последствиям, в том числе к усилению деградации ММП, к развитию опасных геокриологических процессов, нарушению функционирования природных и природно-техногенных систем (газопроводы, дороги, здания и т. д.) [Павлов и Ананьева, 2004]. Другие ученые относятся к таким прогнозам более сдержанно, учитывая сложный характер взаимодействия изменений температур, осадков, снежности в разных ландшафтных условиях, которое может приводить как к деградации, так и к локальной аградации ММП [Конищев, 2009].

Одним из проявлений деградации многолетнемерзлых пород являются формы рельефа, предопределенные термокарстом, обычно представляющие собой просадочные овалы понижения с водой или без нее. Термокарстовые озера достаточно уверенно дешифрируются на космических снимках, что позволяет при наличии пары разновременных снимков в камеральных условиях зафиксировать изменения площадей озер. Подобные работы проводились американскими учеными на территорию Аляски [Fitzgerald and Riordan, 2003] и Западной Сибири [Smith et al., 2005], российскими учеными на территорию Западной Сибири [Днепровская и Полищук, 2008; Кирпотин с соавт., 2008], а в лаборатории аэрокосмических методов географического факультета МГУ на территорию всей криолитозоны России [Кравцова и Быстрова, 2009]. При сопоставлении результатов этих исследований выявляются существенные различия. По данным американских и западносибирских исследователей в зоне сплошной многолетней мерзлоты площади озер увеличиваются, а в зоне прерывистой многолетней мерзлоты – сокращаются, что не соответствует результатам, полученным специалистами МГУ.

Целью работы было проведение детального исследования на территории Западной Сибири с использованием разных методик для уточнения результатов и выявления действительного характера изменений площадей термокарстовых озер. Работа выполнена в лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ им. Ломоносова.

Материалы и методы исследования

Одним из методов, позволяющих изучать состояние и динамику термокарста, является анализ космических снимков. При этом объектами, наиболее пригодными для массового исследования, в данном случае служат не формы термокарстового рельефа в целом, а именно термокарстовые озера в связи с тем, что их можно непосредственно увидеть и надежно отдешифровать на снимке.

Поскольку изучение изменений термокарстовых озер требует работы в достаточно крупных масштабах (порядка 1:200 000 и крупнее), то выявление их изменений для всей территории распространения термокарстовых озер – слишком большая и трудоемкая работа. Поэтому она производилась и производится на эталонных участках [Кравцова и Быстрова, 2009].

Для анализа было выбрано три эталонных участка, два из которых располагаются в зоне сплошной вечной мерзлоты (в южной части полуострова Ямал и на Гыданском полуострове), а один – в зоне прерывистой вечной мерзлоты (в верховьях реки Надыма): рис. 1. Выбранные эталонные участки частично, а некоторые и полностью перекрываются с тестовыми участками, проанализированными в работе С.Н. Кирпотина, Ю.М. Полищука и Н.А. Брыксиной [2008]. Это позволяет непосредственно сравнить результаты исследований и выявить причины расхождений.

В качестве основных материалов были использованы снимки со спутника Landsat (табл. 1). Наличие в фондах таких снимков от начала 1970 годов до 2000 годов, обеспечивающих временной интервал 20–25 лет (в этот период как раз укладывается 22-х летний цикл солнечной активности [Kasatkina et al., 2007]), и возможность получения их через Интернет определили этот выбор.

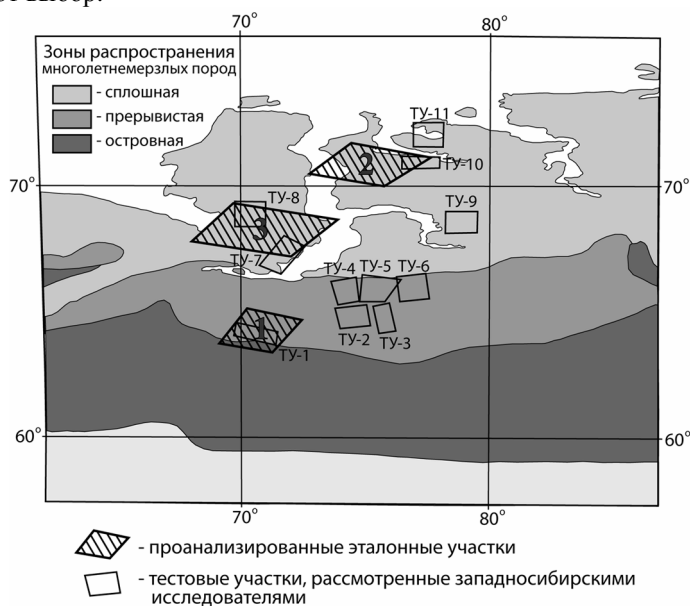


Рис. 1. Карта-схема расположения эталонных участков (зонирование многолетнемерзлых пород приведено по работе Кирпотина с соавт., [2008]).

Таблица 1. Космические снимки, использованные в процессе исследования.

| № | Район | Дата съемки | Съемочная система | Пространственное разрешение, м | Данные о снимке для поиска в Интернет |
|---|------------------------------|-------------|-------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | Верховья реки Надыма | 26.06.1988 | Landsat TM | 30 | p161r15_4t19880626 |
| | | 10.08.2001 | Landsat ETM+ | 30 | p160r15_7t20010810_z42 |
| 2 | Гыданский полуостров | 26.07.1985 | Landsat MSS | 80 | p163r10_5m19850726 |
| | | 08.08.2001 | Landsat ETM+ | 30 | p162r010_7t20010808_z44 |
| 3 | Южная часть полуострова Ямал | 12.08.1973 | Landsat MSS | 80 | – |
| | | 24.06.1985 | Landsat MSS | 80 | p163r12_5m19850624 |
| | | 14.07.2001 | Landsat ETM+ | 30 | p163r012_7t20010714_z42 |

Пространственное и спектральное разрешение указанных снимков в первом приближении позволяет решать поставленную задачу. Разрешение снимков, полученных сканирующими системами TM, ETM+ со спутника Landsat составляет 30 м, что достаточно для выделения термокарстовых озер, размеры меньших из которых обычно составляют от нескольких десятков до сотен метров. Эти сканирующие системы стали работать после 1982 года. В 1970-е годы функционировала система MSS и пространственное разрешение составляло 80 м, что в случае преобладания мелких озер может оказаться недостаточным. Поэтому при работе со снимками такого разрешения необходим контроль по снимкам лучшего разрешения, в качестве которых могут выступать аэрофотоснимки [Кравцова и Быстрова, 2009]. Однако возникает проблема поиска и доступа к этим материалам.

Важной особенностью используемых космических снимков является наличие канала в ближней инфракрасной зоне, обеспечивающего надежное выделение водных поверхностей по яркостным признакам. При этом наряду с ближним инфракрасным каналом использовалась комбинация из ближнего, среднего инфракрасных каналов и красного видимого канала (RGB 453), которая также позволяет четко различить границу между водой и сушей.

При выборе снимков большое значение имеет сезон съемки. Важно использовать разногодичные снимки за один сезон, желательно за близкие даты, иначе возникает опасность принять сезонные изменения за многолетние. Для изучения термокарстовых озер целесообразно применять снимки, полученные в конце лета – даже при сходе снежного покрова на земной поверхности лед на озерах еще долго сохраняется (рис. 2а), что может быть источником ошибок при выявлении динамики озер.

Чтобы избежать влияния водной растительности, которая может появляться на мелких участках озер, целесообразен анализ нескольких снимков за сезон вегетации и за разные годы, что теперь становится возможным в связи со свободным доступом к снимкам через Интернет. На рис. 3 (координаты центра фрагмента: 64°28'с.ш., 71°14'в.д.) представлена серия снимков, на которых отобразилось развитие водной растительности на мелких

озерах в течение вегетационного периода в разные годы. В начале лета, в июне, озера свободны от растительности, а в августе частично зарастают осокой, которая осенью отмирает и в начале следующего года вновь невидима. Сравнение пары таких снимков за разные годы может привести к неправильным выводам об изменении площади озер.

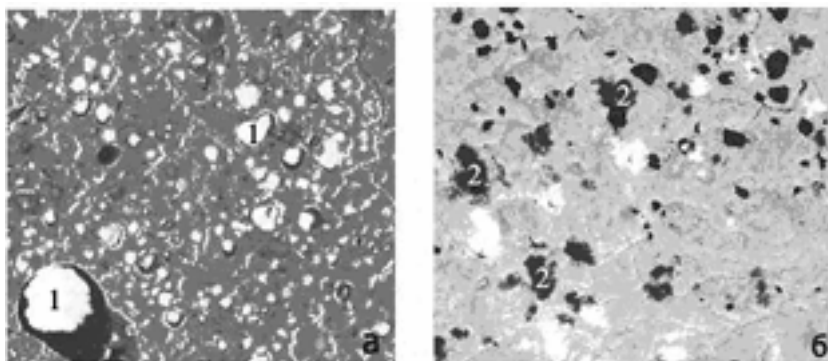


Рис. 2. Трудности при дешифрировании термокарстовых озер на снимках: а – наличие льда на озерах (1), б – наличие теней от облаков (2)

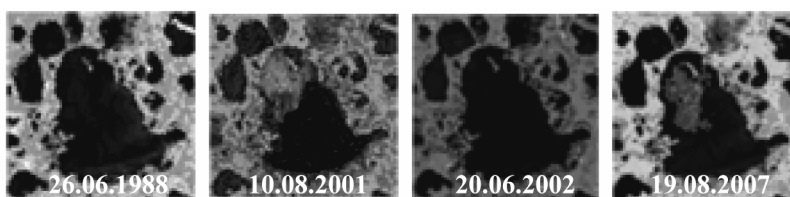


Рис.3. Серия снимков, демонстрирующая изменения водной растительности в течение сезона вегетации в разные годы

При выявлении динамики термокарстовых озер необходимо учитывать антропогенные и пирогенные изменения ландшафтов, что также требует анализа не одной пары, а нескольких разновременных снимков.

Еще одна трудность при выделении озер – наличие теней от облаков (рис. 2б), которые изображаются на снимке таким же тоном, что и озера. Поэтому желательно использовать снимки без облачности.

В процессе исследования выполнялось автоматизированное дешифрирование термокарстовых озер в программном пакете ERDAS Imagine на основе классификации с обучением, для чего на снимках были выделены эталонные фрагменты со значениями спектральной яркости, соответствующей водной поверхности. В результате такой классификации на снимке выделялся только один класс объектов – озера, все остальное не классифицировалось.

В программном пакете ArcGIS осуществлялось совмещение разновременных отдешифрированных материалов для каждого участка и выявление изменений термокарстовых озер. Выявление изменений площади озер основано на определении водной поверхности, являющейся “общей” для снимков за разные даты и наблюдаемой лишь за одну дату. Определение “общей” водной поверхности осуществлялось с помощью “растрового калькулятора” (Raster Calculator), представленного среди опций модуля Spatial Analyst. “Растровый калькулятор” позволяет при наличии двух перекрывающихся изображений (в нашем случае – это изображения отклассифицированных озер за разные даты) получить третье, содержащее лишь те элементы раstra, которые присутствуют на обоих исходных изображениях друг под другом, исключая все остальные. Затем производилось последовательное наложение друг на друга трех растровых изображений: двух изображений с отклассифицированными озерами за разные даты и третьего, содержащего растровые элементы “общей” водной поверхности.

Анализ совмещенных разновременных изображений выполнялся для всей площади эталонных участков (180 × 180 км) при наблюдении на экране с увеличением до масштаба 1 : 50 000, а для наиболее типичных фрагментов составлялись схемы динамики в масштабах 1 : 100 000 – 1 : 250 000. Составлено 12 таких схем динамики (2 на эталонном участке в верховьях Надыма, 2 – на Гыданском полуострове и 8 – на Ямале). Такая картографическая фиксация результатов в виде схем представляет отличительную черту исследований специалистов МГУ. Составленные схемы позволяют анализировать изменения с конкретной привязкой к местности, в ряде случаев выявить причины этих изменений, например, спуск озер в результате эрозионной деятельности водотоков.

Помимо этого для каждого участка определялась общая площадь озер за обе даты и подсчитывалось ее увеличение или уменьшение. Для удобства сравнения результатов по разным районам использовались относительные показатели – увеличение или уменьшение площади озер в процентах от их общей площади.

Результаты и их обсуждение

Результаты для трех эталонных участков оказались различными. **Эталонный участок №1.** Для верховьев реки Надыма, расположенных в южной криолитозоне, в зоне прерывистой многолетней мерзлоты, на основе

визуального анализа совмещенных разновременных снимков после их автоматизированного дешифрирования – практически не видно изменений. Фрагмент, представленный в качестве иллюстрации для территории эталонного участка №1 (рис. 4а: 63°49′с.ш., 70°46′в.д.), показывает уменьшение площади единичного озера.

Но подсчет количественных характеристик – площадей озера и их изменений показал увеличение площадей термокарстовых озера в пределах всего эталонного участка на 4%. Такое увеличение связано, вероятно, с появлением новых очень мелких водоемов (рис. 4б: 64°26′с.ш., 71°12′в.д.), слабозаметных при визуальном анализе. Причиной появления и расширения этих водоемов могла быть либо активизация термокарстовых процессов (образование новых термокарстовых озера), либо наполнение небольших понижений рельефа за счет осадков. Проверка на основе метеорологических данных показала, что в период, предшествовавший съемке, в 2001 году было зафиксировано значительно большее по сравнению с 1988 годом количество осадков, как в день съемки, так и до него (рис. 5).

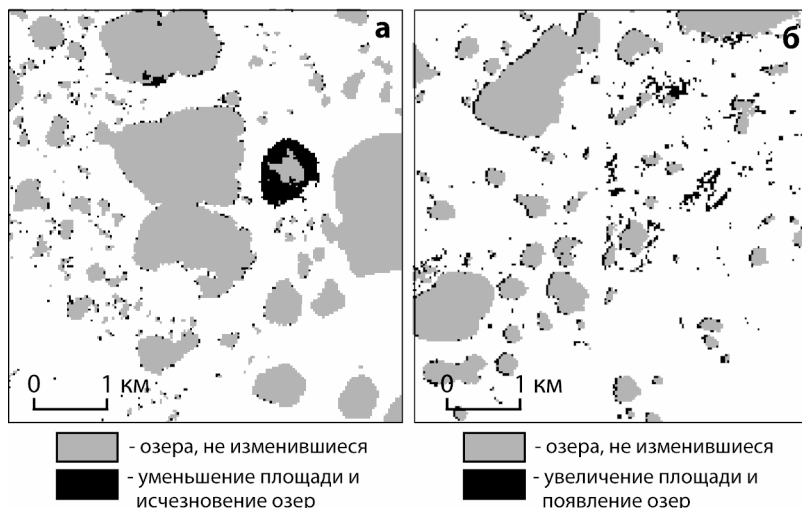


Рис.4. Схемы динамики термокарстовых озера на фрагмент эталонного участка №1 (1988 – 2001 гг.)

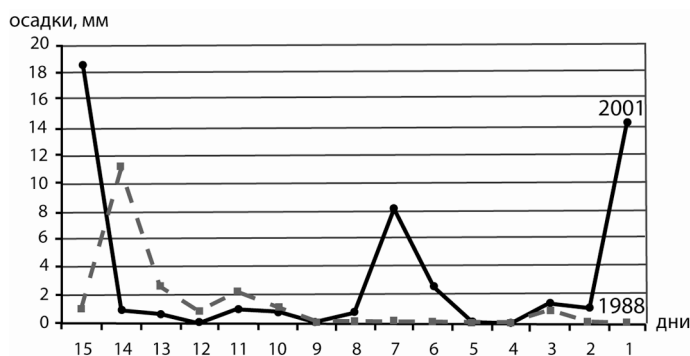


Рис.5. График хода осадков в течение 15 дней до даты съемки

В течение 15 дней до непосредственной даты съемки (10 августа) в 2001 году выпало 1/4 всех летних осадков этого года, в то время, как в 1988 году к дате съемки – 26 июля – эта величина составила порядка 1/10 всех летних осадков этого года. Непосредственно в день съемки в 2001 году выпало 14,4 мм, а в 1988 – 0 мм атмосферных осадков. Таким образом, появление новых мелких водоемов вероятно обусловлено обилием атмосферных осадков в рассматриваемый период.

Западносибирскими исследователями на территории представленного эталонного участка было зафиксировано уменьшение площадей термокарстовых озера на 22% [Кирпотин с соавт., 2008]. Результаты эти основаны на анализе аналогичных космических снимков 1988 и 2001 гг. Однако в процессе исследования этих авторов рассматривались лишь наиболее крупные термокарстовые озера (более 20 га), что и может служить объяснением расхождения результатов двух исследований. Составленные схемы наглядно демонстрируют лишь единичные примеры спущенных озера, не в таких масштабах, как у западносибирских исследователей. Анализ схем показал, что такой спуск озера не имеет повсеместного характера, осушены отдельные единичные термокарстовые котловины, что может быть связано с зарастанием этих котловин.

Эталонный участок №2. На Гыданском полуострове, расположенном в северной криолитозоне в зоне сплошного распространения ММП, на основе как визуального анализа составленных схем динамики термокарстовых озера, так и подсчета площадей, было выявлено незначительное уменьшение площадей термокарстовых озера (рис. 6: 70°57′с.ш., 76°6′в.д.), которое для всего участка в целом составило порядка 3%, а на представленном фрагменте детального картографирования – 13%. Фрагмент детального картографирования был выбран в пределах эталонного участка именно в том месте, где изменения термокарстовых озера наиболее заметны,

поэтому уменьшение площади оказалось больше по сравнению с показателем, характеризующим эталонный участок в целом. Это свидетельствует о том, что на остальной части эталонного участка (за пределами рассмотренного фрагмента) термокарстовые озера практически не изменились. Наибольшие изменения термокарстовых озер приходится на участки, тяготеющие к речным долинам, а наименьшие – на поверхности плакоров.

В отличие от наших результатов западносибирскими исследователями в пределах территории представленного эталонного участка на участке ТУ-10 было зафиксировано увеличение площадей термокарстовых озер на 10% [Кирпотин с соавт., 2008]. Это противоречие частично может быть обусловлено различиями в методике исследований, тем, что во втором исследовании проводился анализ лишь выборочных крупных озер (более 20 га). Чтобы обеспечить сопоставимость результатов, мы также ввели ограничение по размерам учитываемых озер. Однако даже при рассмотрении лишь наиболее крупных озер в пределах нашего участка налицо уменьшение их площадей и исчезновение некоторых из них.

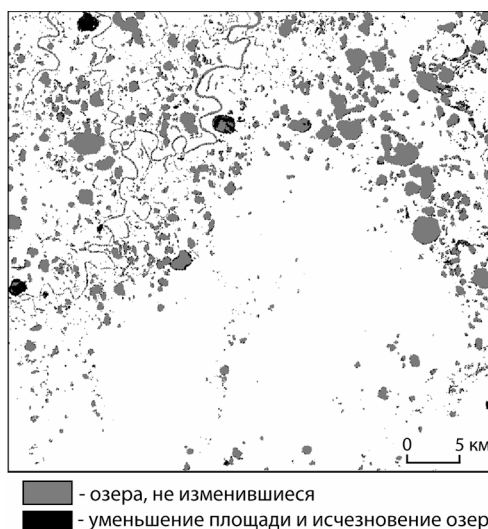


Рис.6. Схема динамики термокарстовых озер на фрагмент эталонного участка №2 (1985 – 2001 гг.)

Эталонный участок №3. При анализе участка в южной части полуострова Ямал, который находится в северной криолитозоне в зоне сплошного распространения ММП, обнаружено уменьшение площадей термокарстовых озер. Этот участок по площади перекрывается с одним из эталонных участков, проанализированных ранее [Кравцова и Быстрова, 2009], где также выявлено уменьшение площади озер. На этом участке параллельно с картографированием изменений всех озер был также частично использован подход западносибирских исследователей, когда анализировались лишь крупные озера. Но и при таком подходе подтвердилось уменьшение площадей термокарстовых озер на всех 8 фрагментах от 2 до 30%: рис. 7: 68°43'с.ш., 70°36'в.д. (а), 67°39'с.ш., 70°11'в.д. (б).

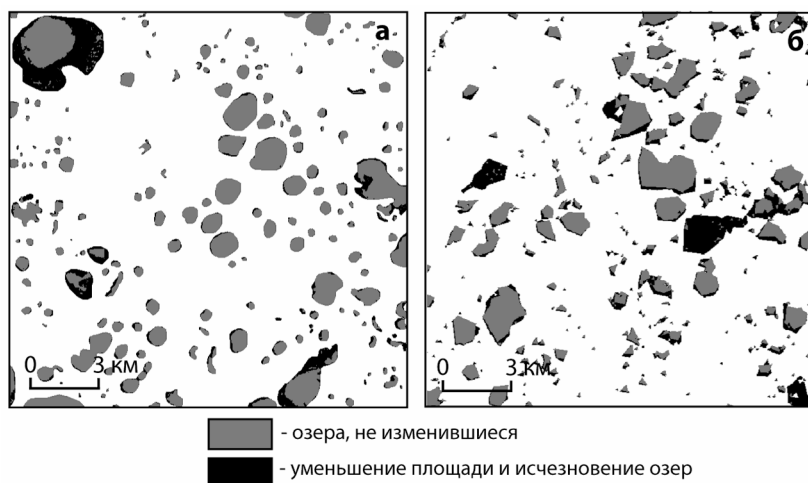


Рис.7. Схемы динамики термокарстовых озер на двух фрагментах эталонного участка №3: а - 1985 – 2001 гг., б – 1973 – 2001 гг.

Западносибирскими же исследователями в пределах их тестовых участков ТУ-8 и ТУ-7, перекрывающихся с рассматриваемыми, было установлено увеличение площадей термокарстовых озер на 7% и 10% соответственно [Кирпотин с соавт., 2008], что никак не соответствует составленным нами схемам изменений термокарстовых озер.

Таким образом, даже при рассмотрении лишь крупных термокарстовых озер результаты исследований противоречат друг другу.

Выводы

Изучение изменений термокарстовых озер в период потепления климата, проведенное на севере Западной Сибири по разновременным космическим снимкам различными исследователями, дало разные результаты. В исследованиях специалистов Томского университета и американских коллег выявлено увеличение площади озер в зоне сплошного распространения ММП и уменьшение в зоне прерывистого распространения ММП, объясняемые воздействием потепления, а картографирование динамики термокарстовых озер специалистами МГУ показало стабильность их сети в обеих зонах при небольшом сокращении площади озер по гидрологическим причинам, в связи с эрозивной деятельностью рек. Выполненное для уточнения этих результатов дополнительное исследование по разновременным космическим снимкам на трех эталонных участках (в верховьях реки Надыма, на Гыдане и Ямале) подтвердило, что за последние 25-30 лет в этих районах произошло небольшое и не повсеместное, а локальное сокращение площади термокарстовых озер в связи с их спуском реками. Исследование показало необходимость анализа осадков в период, предшествующий космической съемке, выпадение которых может быть источником ошибок. Также необходим анализ неотектонических процессов, которые могут вызвать изменения термокарстовых озер. Однако основная причина расхождений – различия в методиках выборочного статистического исследования (работы Томского университета) и сплошного картографирования изменений в пределах эталонных участков (работы Московского университета), которое представляется более достоверным. В то же время авторы отчетливо понимают необходимость подкрепления полученных выводов полевыми наблюдениями и оценки достоверности и точности определения изменений площадей термокарстовых озер, для чего теперь может быть использована активно выполняемая в последние годы космическая съемка высокого разрешения.

Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за критические замечания, особенно ценные для дальнейшего развития наших исследований.

Литература

- Павлов А.В., Ананьева Г.В. 2004. Оценка современных изменений температуры воздуха на территории криолитозоны России // Криосфера Земли. Т. 8. № 2. С. 3-9.
- Днепровская В.П., Полищук Ю.М. 2008. Геоинформационный анализ геокриологических изменений в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири с использованием космических снимков // Геоинформатика. № 2. С. 9-14.
- Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. 2008. Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления // Вестник ТГУ. №311. С. 185-189.
- Кравцова В.И., Быстрова А.Г. 2009. Изучение изменений распространения термокарстовых озер России по разновременным космическим снимкам // Криосфера Земли. Т. 15. №2. С. 16-26.
- Конишев В.Н. 2009. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестник МГУ. Серия 5: География. № 4. С. 10-20.
- Fitzgerald D., Riordan B.A. 2003. Permafrost and ponds. Remote sensing and GIS used to monitor Alaska wetlands at the landscape level // Agroborealis. V. 35. N. 1. P. 30-35.
- Kasatkina E., Shumilov O., Lukina N.V., Krapiec M., Jacoby G. 2007. Stardust component in tree rings // ScienceDirect. Dendrochronologia. V. 24. P. 131-135.
- Smith L.C., Sheng Y., Macdonald G.M., Hinzman L.D. 2005. Disappearing Arctic Lakes // Science. V. 308. N. 5727. P. 1429.
<http://glcf.umiacs.umd.edu/data/landsat/>

INVESTIGATION OF CHANGES IN THERMOKARST LAKE DISTRIBUTION IN WEST SIBERIA BY MULTITEMPORAL SATELLITE IMAGES

V.I. Kravtsova, T.V. Tarasenko

Investigations of changes in thermokarst lake by multitemporal satellite images were created by researchers of Russia, Canada and the USA. Results of these investigations in West Siberia are different. Scientists from the Tomsk University and American researches revealed increase of lake areas in the Northern geocryological zone and decrease of them in the Southern geocryological zone. They explain this fact by the influence of the global warming. But the investigators from the Moscow State University revealed that the lake areas are practically stable in both geocryological zones, except the small decrease because of erosive activity of rivers. Consequently we have carried out detailed investigations using different methods to specify type of changes of the thermokarst lakes areas. Investigations were based on comparison of space images, mainly from Landsat satellites, taken in 1970ies – the beginning of 1980ies and in 2000ies, with interval of 20-30 years. The analysis of multitemporal images was made for 3 test sites (in the upper reaches of the river Nadym, on the Gydan and Yamal peninsulas). These test sites partially overlap test sites that were analyzed by scientists from the Tomsk University. Our investigation confirmed relative stability of thermokarst lakes and small local decrease of thermokarst lake areas in both geocryological zones caused by erosive activity of rivers. The investigation showed necessity of precipitation registration in the period before the date of observation. Precipitations may be the source of mistakes. The other cause of divergence in results is the differences in methods. Scientists from the Tomsk University analyze only large lakes (more than 20 hectares), but our investigations include analyzes of all the lakes by the use of mapping the dynamics of lakes. We consider that our method is more reliable.

Key words: thermokarst lakes, multitemporal satellite images.

Поступила в редакцию: 12.11.2009
Переработанный вариант: 12.12.2009