

ИЗМЕНЕНИЕ РАЗМЕРОВ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР В РАЗЛИЧНЫХ РАЙОНАХ РОССИИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 30 ЛЕТ

В.И. Кравцова, А.Г. Быстрова

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
географический ф-т, кафедра картографии и геоинформатики,
119992, Москва, Воробьевы горы, Россия, vik@lakm.geogr.msu.ru*

Представлены результаты исследования изменений термокарстовых озер на территории России на основе сравнения космических снимков, главным образом со спутников Landsat, сделанных с интервалом 20–30 лет в 1970-х–начале 1980-х гг. и в 2000-х гг. Сопоставление разновременных снимков выполнено на 19 эталонных участках на территории России, выбранных в различных геокриологических и ландшафтных условиях. На большей части территории (11 участков) изменений озер не обнаружено. На трех участках в северной геокриологической зоне (на Южном Ямале, левобережье Пура, правобережье Енисея) произошло уменьшение площади озер в связи с их дренажем, а на Яно-Индигирской низменности имели место как спуск озер, так и заполнение озерных котловин. В Центральной Якутии отмечено значительное (двукратное) увеличение площади озер; расширение озер и появление новых малых озер наблюдается на трех участках в южной геокриологической зоне (Верхнеангарская и Баргузинская котловины Забайкалья, Удская губа на Дальнем Востоке).

Термокарстовые озера, разновременные космические снимки, изменения за 20–30 лет

CHANGES IN THERMOKARST LAKE SIZE IN DIFFERENT REGIONS OF RUSSIA FOR THE LAST 30 YEARS

V.I. Kravtsova, A.G. Bystrova

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cartography and Geoinformatics,
119992, Moscow, Vorobyovy Gory, Russia, vik@lakm.geogr.msu.ru*

The results of investigation of changes in thermokarst lake distribution in Russia have been presented. Investigations were based on comparison of space images, mainly from Landsat satellites, taken in the 1970s – the beginning of 1980s and in 2000s, with an interval of 20–30 years. The analysis of multitemporal images was made for 19 test sites on the Russian territory chosen in different geocryological and landscapes conditions. There were no changes on the most part of territory (11 test sites). At 3 test sites in the Northern geocryological zone (the Southern Yamal, left-bank of the Pur River, right-bank of the Yenisei River) the decrease of lake area resulted from erosion, and at the Yana–Indigirka lowland the both processes – discharge of lakes and filling of lake depressions with water – took place. In Central Yakutia a noticeable increase in lake areas (twice) was found. The increase in lake area and appearance of new small lakes occurred at 3 test sites in the Southern geocryological zone (Verhneangarsk and Barguzin depressions in Zabaikal'e, coast of the Uda River Bay in the Far East).

Thermokarst lakes, multitemporal satellite images, changes during 20–30 years

ВВЕДЕНИЕ

Одно из предположительных ожидаемых последствий глобального потепления климата – деградация вечной мерзлоты – может существенно изменить условия жизни и дальнейшего освоения территории огромной части нашей страны, 67 % площади которой занято многолетнемерзлыми породами (ММП). Изменение состояния вечной мерзлоты должно в первую очередь сказаться на процессах термокарста, в частности, на распространении термокарстовых озер, которые можно рассматривать как индикатор протаивания мерзлого грунта. Термокарстовые процессы на территории России детально изучены [Качурин, 1961; Данилова, 1974; Суходровский, 1979; Данилова, Фотиев, 1989; Воскресенский, 2001]. Термокар-

стовые озера хорошо отображаются на аэроснимках и снимках со спутников, разработаны методы их дешифрирования [Протасьева, 1967], поэтому возможен дистанционный мониторинг их сети, т. е. появления или исчезновения термокарстовых озер, увеличения или уменьшения их площади.

Необходимость применения космических снимков для исследования изменений различных объектов криосферы очевидна; достаточно широко развит космический мониторинг морских льдов, снежного покрова, покровных и горных ледников. Однако можно назвать лишь единичные примеры использования космических снимков для изучения изменений форм термокарстового рельефа и термокарстовых озер. При их изучении на нескольких

тестовых участках Аляски обнаружено сильное сокращение площадей термокарстовых озер с 1950 по 2001 г. [Fitzgerald, Riordan, 2003]. Подобные исследования, выполненные для Западной Сибири за период 1973–2005 гг., показали сокращение площадей термокарстовых озер в зоне прерывистого и увеличение их площадей в зоне сплошного распространения ММП [Брыксина и др., 2006; Днепровская, Полищук, 2008; Курпотин и др., 2008; Smith et al., 2005].

Между тем на огромной территории зоны распространения ММП в России геокриологические условия чрезвычайно разнообразны. Региональные проявления общего глобального потепления климата Земли также сильно различаются, иногда имеют разные тренды в соседних районах. Это означает, что в случае реакции термокарстовых процессов на глобальное потепление климата изменения термокарстовых озер в разных регионах также могут быть различными.

В связи с этим в лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ предприняты исследования, цель которых выявить, какие из-

менения произошли (и произошли ли) с термокарстовыми озерами в различных районах зоны распространения ММП в России за последние десятилетия. На этом этапе мы поставили перед собой пока лишь инвентаризационную задачу – выявить и закартографировать эти изменения с тем, чтобы в дальнейшем совместно с мерзлотоведами выполнить анализ процессов, вызвавших эти изменения, и выяснить, связаны ли эти изменения с глобальным потеплением климата.

КАРТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР РОССИИ

Для выполнения такого исследования прежде всего нам потребовалась общая картина распространения термокарстовых озер на территории нашей страны. На основе анализа космических снимков, представленных на Интернет-портале Google Earth, где хорошо отображаются термокарстовые озера и крупные формы термокарстового рельефа, нами была составлена карта распространения термокарстовых озер на территории России м-ба 1:8 000 000. На этой карте впервые

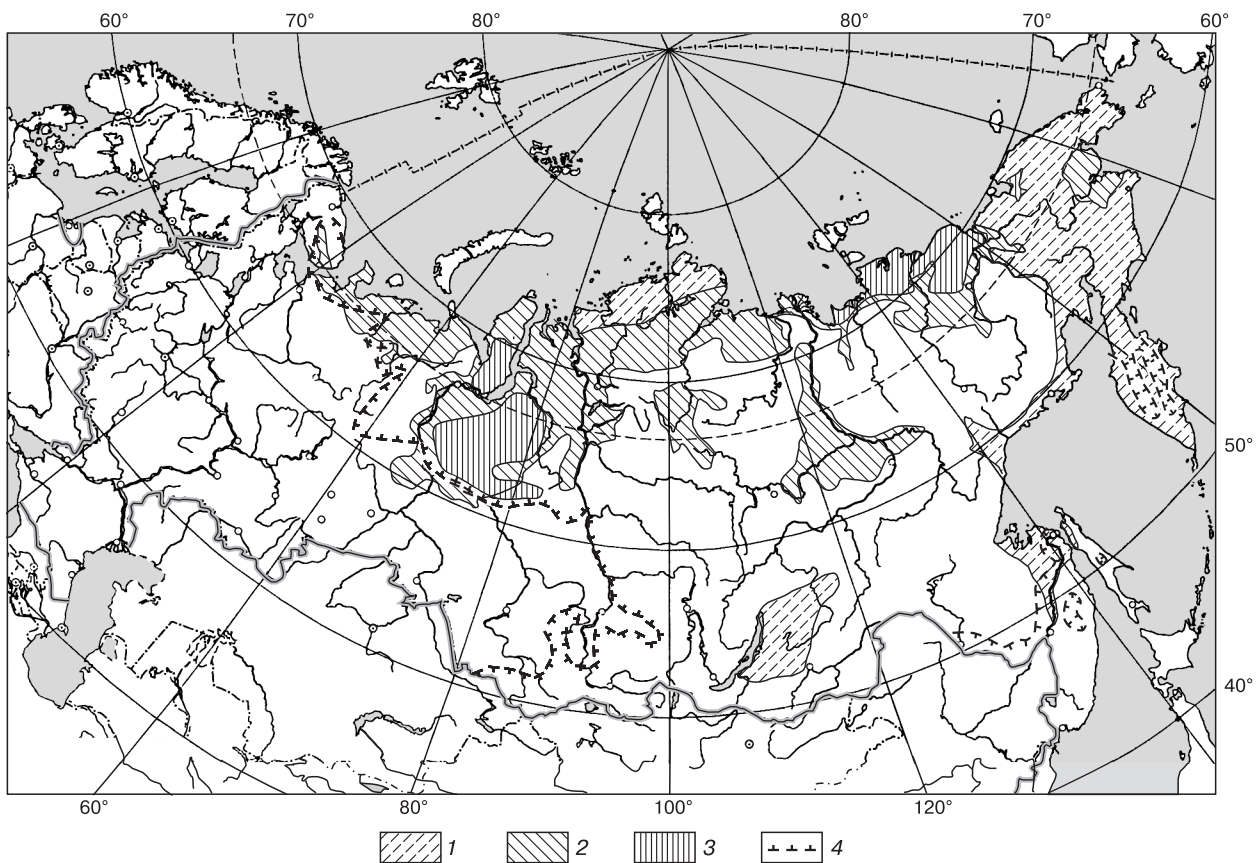


Рис. 1. Схема районов распространения термокарстовых озер на территории России:

1 – районы локального распространения преимущественно малых озер; 2 – районы повсеместного распространения преимущественно малых и средних озер; 3 – районы повсеместного распространения преимущественно средних и крупных озер; 4 – южная граница криолитозоны.

о контуры участки массового распространения термокарстовых озер с указанием их характерных размеров. На карте видно, что термокарстовые озера распространены в зоне современного развития ММП повсеместно в пределах равнинных территорий, сложенных рыхлыми отложениями, а также выходят за пределы этой зоны в районах Печорской низменности в европейской части России, Кондомской низменности в Западной Сибири и на северо-западе Сахалина. Составленная на основе этой карты обобщенная схема основных районов распространения термокарстовых озер приведена на рис. 1.

ЭТАЛОННЫЕ УЧАСТКИ

Поскольку изучение изменений термокарстовых озер требует работы в достаточно крупных масштабах (порядка 1:200 000), выявление их изменений для всей территории распространения термокарстовых озер слишком большая и тру-

доемкая работа. Поэтому она проводилась на эталонных участках. При выборе участков мы руководствовались двумя соображениями: желанием максимально охватить разнообразие ландшафтных и мерзлотных условий; наличием космических снимков, полученных с 20–30-летним интервалом в последней трети XX в., когда глобальное повышение температур было выражено наиболее четко. Удалось подобрать такие пары снимков для 19 эталонных участков, размещение их дано на рис. 2. Участки выбраны в различных географических поясах и природных зонах суши: в зоне тундр арктического пояса (Северный Таймыр, дельта Лены, Яно-Индигорская низменность), в зонах тундр и лесотундр субарктического пояса (бассейн Печоры на севере Восточно-Европейской равнины, южная часть Ямала, междуречье Таза и Пура на Западно-Сибирской низменности, правобережье нижнего Енисея, южная часть Таймыра, депрессия в районе оз. Ессей на Среднесибирском плоскогорье, долина Малого Анюя в горах Северо-

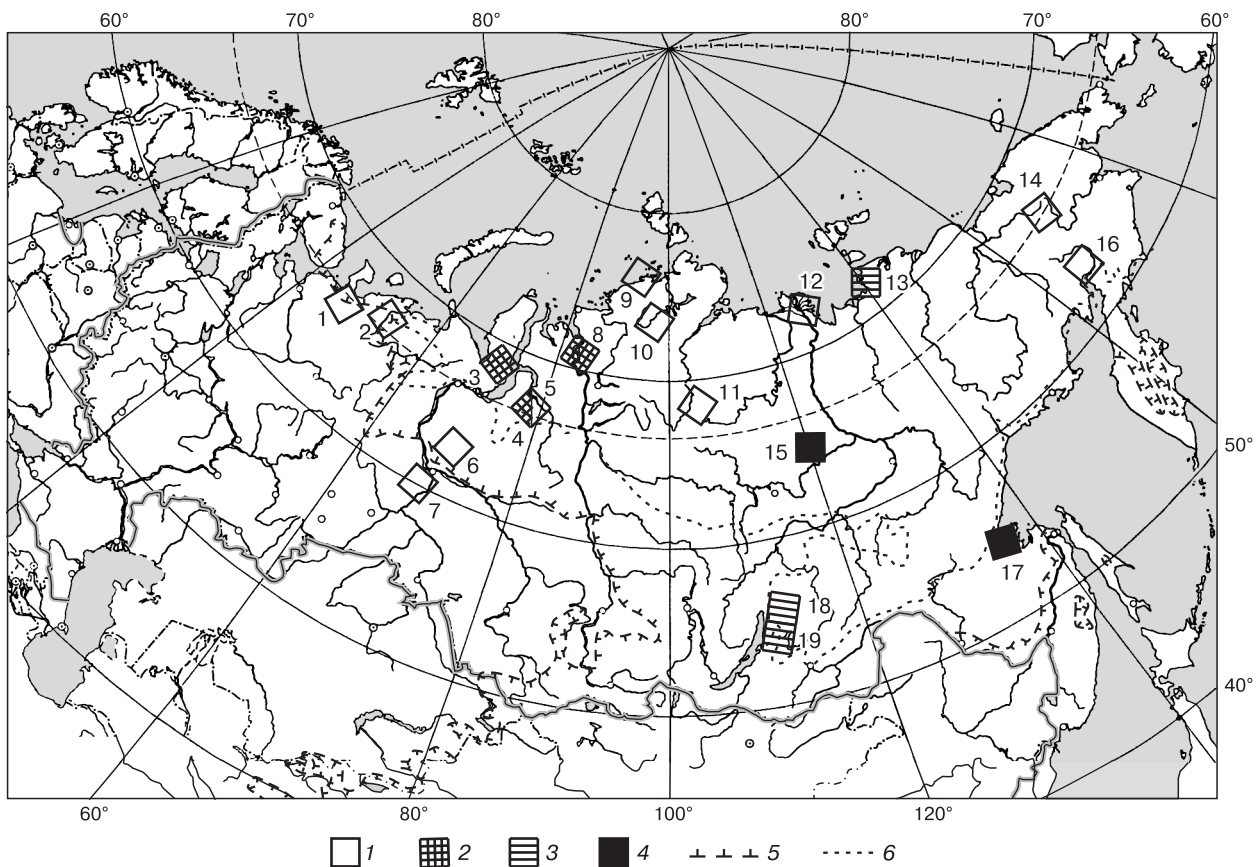


Рис. 2. Размещение эталонных участков (1–19) для изучения изменений термокарстовых озер по разновременным космическим снимкам с 20–30-летним интервалом и основные результаты по участкам.

1 – изменения не обнаружены; 2 – уменьшение площади термокарстовых озер; 3 – уменьшение площади одних озер и увеличение других; 4 – увеличение площади и появление новых термокарстовых озер; 5 – южная граница криолитозоны; 6 – граница между северной зоной сплошного распространения ММП и южной зоной прерывистого и островного распространения ММП.

Востока), в зоне северной тайги (район Мезенской губы на севере Восточно-Европейской равнины, южная часть Западно-Сибирской низменности, Центральная Якутская равнина, побережье Пенжинской губы на Дальнем Востоке), в зоне южной тайги и даже на участках островных южно-сибирских степей (Верхнеангарская и Баргузинская впадины Забайкалья). Для набора эталонных участков характерны разные мерзлотные условия, они находятся в районах сплошного, прерывистого, островного распространения ММП при льдистости ММП от менее 20 до более 40 % (вплоть до 90 %), при мощности ММП от 10–50 до 300–500 м, глубина сезонного протаивания от менее 0,5 до более 2 м и среднегодовых температурах пород от +2 до ниже –11 °С (характеристики ММП здесь и далее даны в обобщенном виде в соответствии с картой “Подземные льды” в Атласе снежно-ледовых ресурсов мира [1997]). Есть эталонный участок и за пределами границ современных ММП (Кондомская низменность), где распространены только реликтовые мерзлые толщи, залегающие на глубинах 100–200 м.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве основных материалов для изучения изменений термокарстовых озер использованы снимки со спутников Landsat. Наличие в фондах таких снимков с начала 1970-х (1972 г.) до 2000-х гг., обеспечивающих временной интервал в 25–30 лет, и возможность поиска снимков и их получения через Интернет (использовался сайт nsidc.org) определили этот выбор. Часть снимков со спутника Landsat имелась в фондах лаборатории аэрокосмических методов в бумажном виде; они были переведены в цифровую форму сканированием. Использовались также снимки с космического корабля “Союз-22”, переведенные в цифровую форму при цифровании дубль-негативов на фотограмметрическом сканере.

Пространственное и спектральное разрешение указанных снимков в первом приближении позволяет решать поставленную задачу. Разрешение снимков, полученных сканирующими системами TM, ETM+ (которые стали работать после 1982 г.) со спутников Landsat, – 30 м, а снимков, сделанных камерой МКФ-6 с космического корабля “Союз-22”, – 20 м. Этого достаточно для выделения термокарстовых озер, размеры меньших из которых обычно составляют от нескольких десятков до сотни метров. Разрешение снимков, сделанных со спутников Landsat в 1970-е гг. системой MSS, – 80 м. В случае преобладания мелких озер оно может оказаться недостаточным, и при предположительном обнаружении по ним изменений необходим дополнительный контроль по снимкам лучшего разрешения. Наличие в перечисленных

съёмочных системах канала в ближней инфракрасной зоне обеспечивает надежное выделение водных поверхностей по признаку яркости.

При выборе снимков большое значение имеет сезон съемки. Целесообразно применять снимки, сделанные в конце лета, так как даже после схода снежного покрова на суше ледовый покров на озерах долго сохраняется, что мешает выделению озер при автоматизированном дешифрировании.

Другие трудности, возникающие при выделении озер, – наличие теней от облаков, а также участков гарей, которые могут изображаться таким же темным тоном, как и озера. Эти проблемы решаются при визуальном дешифрировании с использованием косвенных признаков таких сходных объектов, а при автоматизированном выделении озер приходится прибегать к созданию так называемых индексных изображений (например, на основе расчета индекса водности), с помощью которых затем изготавливают дополнительные изображения – “маски” для изъятия мешающих объектов при классификации снимка.

Для того чтобы обеспечить возможность совмещения (наложения) разновременных снимков, потребовалась предварительная обработка исходных изображений, которая выполнялась в программе ERDAS Imagine. Снимки, полученные через Интернет, уже имели координатную привязку и служили в качестве основы для трансформирования и привязки остальных снимков. На каждом снимке выделены озера с использованием классификации с обучением, для чего на снимках в ближней инфракрасной зоне были определены эталонные фрагменты, соответствующие водной поверхности. В результате классификации на снимках выделялся только один класс объектов – вода, все остальное не разделяли. При помощи операторов Model Maker и AND в программе ERDAS Imagine разновременные пары классифицированных изображений совмещались, что позволяло выделить три группы объектов: водную поверхность на обе даты съемки, появившуюся и исчезнувшую водную поверхность. Полученные совмещенные изображения оформлялись в виде автоматизированных схем дешифрирования в программе ArcView. Такая обработка выполнялась для полных “сцен” Landsat, охватывающих площадь 185 × 185 км. Но малые размеры термокарстовых озер и небольшие изменения их площадей не дают возможности представить графически результаты автоматизированного выявления изменений термокарстовых озер на всей площади эталонных участков в масштабе 1:1 000 000. Представление результатов целесообразно в виде увеличенных фрагментов схем автоматизированного дешифрирования в масштабах 1:200 000, 1:100 000 или 1:50 000, часть из которых приведена ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В целом 19 эталонных участков охватывают площадь 650 000 км². На 11 из 19 участков при сравнении разновременных снимков, сделанных с интервалом 15–30 лет, не обнаружено изменений количества и площади термокарстовых озер. На восьми участках такие изменения отмечены, но они носят разнонаправленный характер. На трех участках – Южном Ямале, левобережье Пура и правобережье нижнего Енисея (№ 3, 4, 8) – наблюдается уменьшение площади и исчезновение отдельных озер, которое, впрочем, не носит повсеместного характера. На участке Яно-Инди-гирской низменности (№ 13) зафиксировано как исчезновение отдельных озер, так и появление новых или увеличение площади существовавших озер. Но это явление также не повсеместное, локальное и связано, скорее всего, не с тепловым состоянием ММП, а с поверхностной эрозией, изменениями сети водотоков. Разнонаправленные изменения озер обнаружены и на эталонных участках в Верхнеангарской и Баргузинской впадинах Забайкалья (№ 18, 19), где отмечено как частичное осушение некоторых наиболее крупных озерных котловин, причем в их центральных частях, так и расширение существовавших озер и появление небольших новых озер, которое наблюдается повсеместно. И наконец, на двух эталонных участках отмечено повсеместное расширение площади существовавших озер и появление новых небольших озер. Для одного из них, на Дальневосточном побережье, на берегах Удской губы (№ 17), как и для впадин Забайкалья, характерно появление большого количества малых озер, а для другого, в Центральной Якутии, на левобережье Вилюя (№ 15) – увеличение ранее существовавших озер, заполнение водой аласных котловин.

Рассмотрим результаты сравнения разновременных снимков по каждому из эталонных участков более детально.

Для *севера Восточно-Европейской равнины* с островным распространением ММП характерна разреженная сеть небольших (до 1 км в поперечнике) термокарстовых озер, сгущение которой и увеличение размеров озер до 2–3 км наблюдается на приморских территориях и в понижениях рельефа вдоль речных долин. Сравнение разновременных снимков выполнено на двух эталонных участках. Первый расположен на *правобережье Мезени*, южнее границы ММП, на моренной равнине максимального оледенения с северотаежными ландшафтами. Небольшие озера размером в поперечнике 0,3 км сочетаются с крупными размером 3 км. При сравнении снимков 1988 и 2000 гг. изменений озер на этом участке за 12 лет не обнаружено. Второй участок расположен в *нижнем течении Печоры*, в зоне массивно-островного распространения ММП, на равнине ледниково-мор-

ской аккумуляции с субарктическими лесотундровыми ландшафтами. Озера размером 1–1,5 км образуют разреженную сеть. При сравнении снимков 1980 и 2001 гг. изменений озер за 21 год не обнаружено.

В *Западной Сибири* эталонные участки охватывают как северную геофизиологическую зону со сплошным распространением мерзлых толщ, так и южную с массивно-островным, островным и редко-островным распространением ММП [Геофизиология СССР, 1988; Романовский, 1993]. Для этой обширной территории с различными мерзлотными и ландшафтными условиями характерны и значительные различия в густоте сети и размерах термокарстовых озер. Наибольшее сгущение сети, увеличение заозеренности характерно для южной части Ямала, левобережий Пура и Таза, северных и южных склонов Сибирских Увалов. Эталонные участки северной геофизиологической зоны расположены на Южном Ямале, правобережье Енисея, левобережье Пура и в Пур-Тазовском междуречье.

Участок на *Южном Ямале* охватывает группу крупнейших озер Ярото, Войварето и прилегающие территории морских равнин с субарктическими тундровыми ландшафтами. Кроме крупнейших озер размером в поперечнике 10–20 км развита густая сеть крупных озер размером 2–3 км, сочетающихся с более мелкими (0,2–0,5 км). Характерно массовое развитие термокарстовых котловин без озер (хасыреев) тех же размеров, в центральных частях которых наблюдается подъем поверхности в связи с новообразованием ММП, а на участках между котловинами прослеживается сеть эрозионных форм. При сравнении снимков 1973 и 2000 гг. обнаружены существенные изменения озер за 27 лет (рис. 3). Часть крупных озер была спущена небольшими речками и превратилась в хасыреи. Площади значительной части озер уменьшились и вокруг них появилась кайма обсохшей поверхности – начальная стадия формирования хасырея. Старые хасыреи остались в прежнем состоянии.

Участок на *правобережье нижнего Енисея*, в 100 км восточнее его дельты, расположен на моренных и водно-ледниковых равнинах последнего оледенения с субарктическими тундровыми ландшафтами. Отдельные крупные озера (5 км в поперечнике) сочетаются с небольшими озерами (0,5–1,5 км) и хасыреями таких же размеров. Сравнение снимков 1973 и 2000 гг. показало уменьшение площади озер. Одно крупное озеро, как видно на фрагменте снимка (рис. 4), было спущено речкой, а площади большинства небольших озер сократились с образованием широкой каймы обсыхания вокруг них. Часть хасыреев, вдоль бортов которых существовали кольцевые озера, стали полностью обсохшими.

Участок на *левобережье Пура* расположен в 100 км южнее его устья, вблизи южной границы

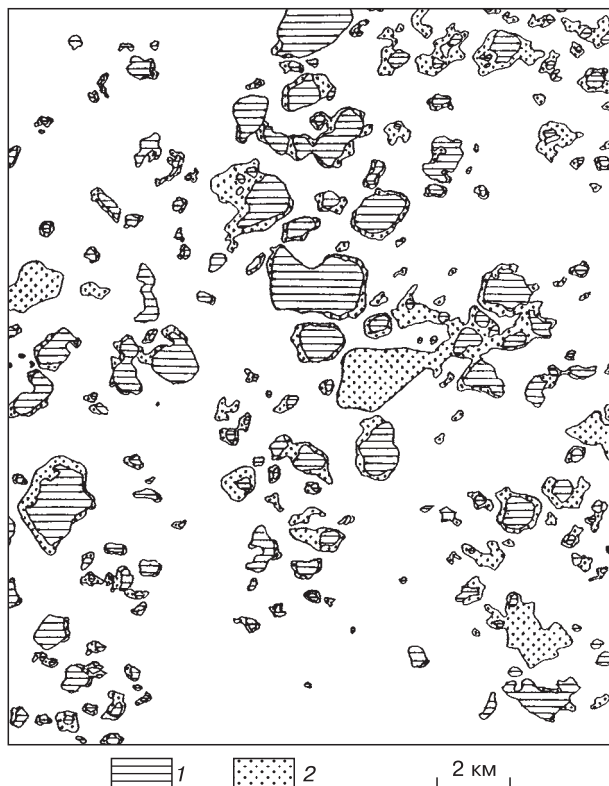


Рис. 3. Изменения распространения термокарстовых озер на участке Южного Ямала (1973–2000 гг.).

1 – вода в 1973 и 2000 гг.; 2 – вода в 1973 г., суша в 2000 г.

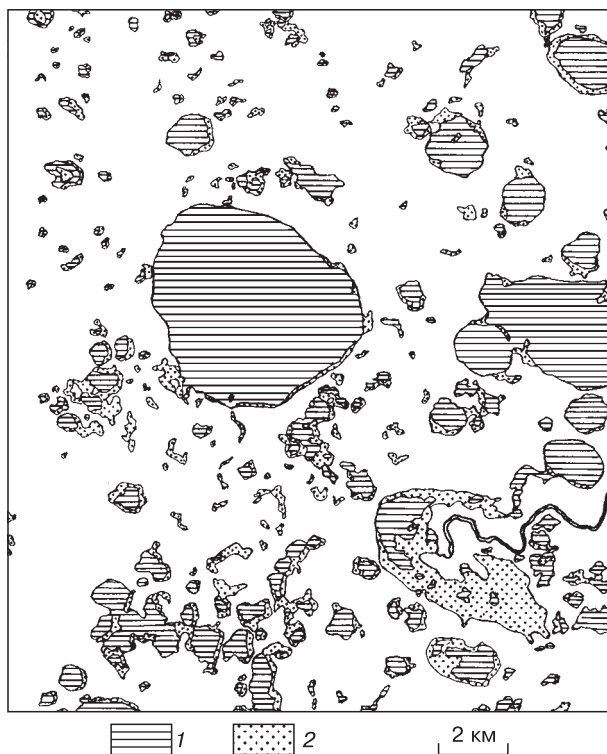


Рис. 4. Изменения распространения термокарстовых озер на участке правобережья нижнего Енисея (1973–2000 гг.).

1 – вода в 1973 и 2000 гг.; 2 – вода в 1973 г., суша в 2000 г.

северной геокриологической зоны (сплошного распространения ММП), на заболоченной аллювиальной равнине с лесотундровыми ландшафтами. Характерна густая сеть озер размером 1–2 км, сочетающихся с более мелкими (0,3–0,5 км); межозерные пространства заняты хасырями, также образующими густую сеть. Сравнение снимков 1973 и 2002 гг. показало произошедшие за 29 лет изменения озер. Несколько озер спущено (полностью или частично). В нескольких случаях наблюдается начальная стадия формирования хасыреев – осушение участков в центральной части озер с постепенным оттеснением воды в периферийную зону и образованием кольцевых озер, характерных для хасыреев (рис. 5).

Участок *междуречья Пура и Таза*, расположенный в 50 км восточнее предыдущего, также вблизи южной границы зоны сплошного распространения ММП, но на хорошо дренированном междуречье с южно-тундровыми ландшафтами, имеет разреженную сеть термокарстовых озер с размерами 1–2 и 0,2–0,5 км. На этом участке изменений озер за 29 лет (снимки 1973 и 2002 гг.) не обнаружено.

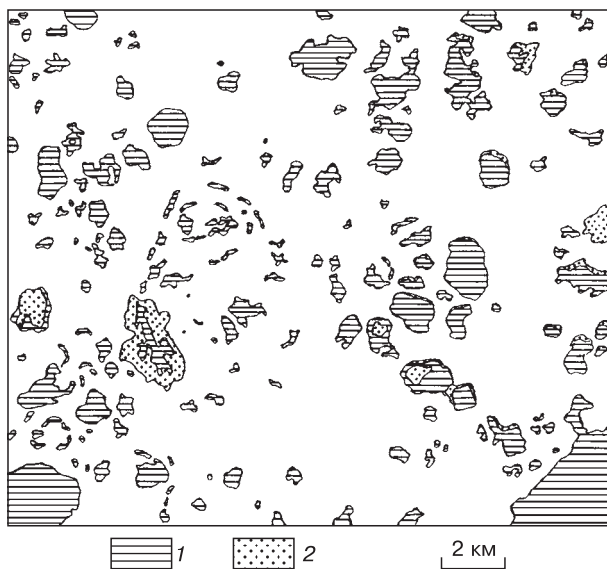


Рис. 5. Изменения распространения термокарстовых озер на участке левобережья Пура (1973–2002 гг.).

1 – вода в 1973 и 2002 гг.; 2 – вода в 1973 г., суша в 2002 г.

В совершенно других условиях находится участок на правом берегу широтного отрезка Оби севернее Сургута, на южном склоне Сибирских Увалов с северотаежными и болотными ландшафтами. Он расположен в зоне островного и редкоостровного распространения мерзлых толщ. Здесь на водораздельных пространствах между долинами рек, расчленяющих южный склон увалов, развита очень густая сеть озер крупных (3–4 км) и средних (0,5–1 км) размеров, а также озерково-мочажинно-грядовых болот, представляющих переходные формы к сети термокарстовых озер. Термокарстовые озера этого района реликтовые и свидетельствуют об активном развитии термокарстовых процессов во время голоценового максимума потепления. На этом участке, находящемся в относительно мягких климатических условиях, наблюдаются процессы зарастания озер – образуются перемычки, расчленяющие озера на более мелкие части, есть озерные котловины с полностью заросшей центральной частью и оставшимися озерами по периферии котловины. Однако при такой, казалось бы, динамической

ситуации, изменений озер за 17 лет при сравнении снимков 1984 и 2001 гг. не обнаружено.

Участок в междуречье Иртыша и Конды, на Кондинской низменности, находится южнее границы распространения ММП. На аллювиальной равнине с южно-таежными ландшафтами распространены крупные (4–6 км) и средние (1 км) озера – также реликты голоценового термокарста. Изменений площади озер с 1976 по 2000 г. здесь не зафиксировано.

В *Средней Сибири* условия для развития термокарста, несмотря на сплошное распространение ММП, не столь благоприятны, поскольку равнинные территории с рыхлыми отложениями имеют ограниченное распространение. Небольшие термокарстовые озера, не образующие густой сети, распространены по правобережью Енисея, на северном побережье и в прогибах между складчатыми структурами гор Бырранга. Сгущение озерной сети и увеличение размеров озер характерно для Северо-Сибирской низменности – Енисей-Хатангского прогиба, побережья моря Лаптевых, дельты Лены. На Среднесибирском плоскогорье сеть озер развита в депрессии оз. Ессей между горами Путорана и Анабарским массивом и на Центральноякутской равнине. Эталонные участки для контроля за изменениями термокарстовых озер расположены на северном побережье Таймыра, в зоне арктической тундры, в южной части Таймыра, в зоне субарктической тундры, в депрессии вокруг озера Ессей, в лесотундре. На всех этих участках изменений озер с 1987 по 2001 г. не произошло. В дельте Лены небольшие изменения связаны со спуском отдельных термокарстовых озер на террасах высокой поймы.

Значительные изменения обнаружены на эталонном участке в Центральной Якутии, расположенном на левобережье Вилюя в его нижнем течении, на покрытом лессовыми суглинками междуречье рек Тюнг и Тюкян – левых притоков Вилюя, в зоне северной лиственничной тайги. Здесь была развита густая сеть аласов со средними (1 км) и малыми (0,2–0,3 км) остаточными озерами. С 1976 по 2001 г. площади озер увеличились более чем в 2 раза, озера заполнили аласные котловины, в результате площадь безводных озерных котловин сократилась в 5 раз, сохранилась лишь узкая кайма аласов вокруг расширившихся озер (рис. 6).

В *Восточной Сибири* обширные приморские низменности – Яно-Индигирская, Колымская, Чаунская, внутренняя Абыйская (где мерзлота не только имеет сплошное распространение, но породы высокой льдистости (80 %) достигают мощности 50–60 м, а мощность ММП в целом составляет 300–500 м) – представляют районы наиболее интенсивного развития термокарста.

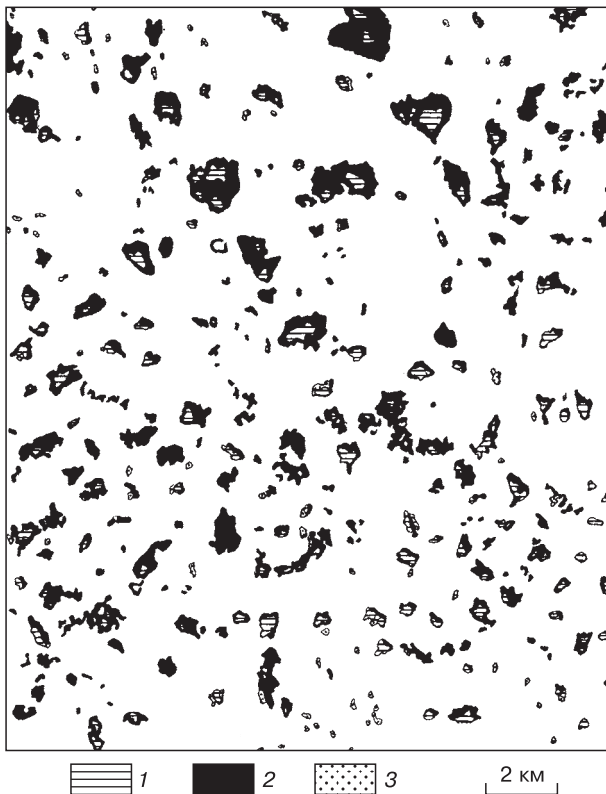


Рис. 6. Изменения распространения термокарстовых озер на участке в Центральной Якутии (1976–2000 гг.).

1 – вода в 1976 и 2000 гг.; 2 – суша в 1976 г., вода в 2000 г.; 3 – вода в 1976 г., суша в 2000 г.

Возникновение большинства термокарстовых озер и образующихся при их дренировании котловин – аласов относится ко времени климатического оптимума в начале голоцена. Особенно крупные термокарстовые формы характерны для обширной Колымской низменности, где густую сеть образуют исключительно крупные (4–6 км, до 8 км) озера, сочетающиеся со средними (0,5–1 км). В горных же районах Северо-Востока небольшие термокарстовые озера сосредоточены в расширениях речных долин, по их днищам. На низкогорьях и холмогорьях Чукотки озера невелики и не образуют сплошной сети.

Эталонные участки этого района, к сожалению, не охватывают наиболее интересной Колымской низменности с крупнейшими озерами и котловинами аласов, образующими густую сеть, поскольку не удалось подобрать подходящих для сравнения пар разновременных снимков – это дело будущего.

Эталонный участок на побережье Селяхской губы моря Лаптевых, в центральной части Яно-Индигирской низменности с арктическими тундровыми ландшафтами, расположен в зоне сплошных ММП с высокой льдистостью (50–90 %) верхней 30–70-метровой рыхлой толщи – ледового комплекса. Густая сеть термокарстовых котловин разной глубины – аласов, сформировавшихся в эпохи потеплений в голоцене, причудливо сочетающихся, образует аласную равнину. Большая часть аласов имеют озера крупных (2–3 км) и средних (до 1 км) размеров. При сравнении снимков 1972 и 2000 гг. (рис. 7) обнаружено, что часть термокарстовых озер исчезла, они были спущены речками. В то же время в отдельных котловинах площадь озер увеличилась, что также связано с изменениями гидрографической сети, впадением в аласы небольших водотоков. Таким образом, разнонаправленные изменения озер здесь связаны не с климатическими причинами, а с эрозионными процессами.

Другой эталонный участок расположен восточнее Колымской низменности, в межгорном прогибе между хребтами Северо-Аноийским и Южно-Аноийским, на правом берегу Малого Аноя, на озерно-аллювиальной равнине в окружении экзарационно-нивалных горных склонов с северотаяжными редкостойными лиственничными лесами. Термокарстовые озера малых размеров (0,2–0,5 км, до 1 км) имеют разнообразную форму котловин, что характерно для районов с близким залеганием коренных пород. При сравнении снимков 1972 и 2000 гг. изменений озер не обнаружено.

На Дальнем Востоке горные хребты подходят близко к побережью, и в узкой полосе прибрежных равнин лишь для Анадырской низменности характерно сплошное, а южнее – пре-

рывистое и островное распространение ММП. Здесь сеть термокарстовых озер занимает значительную площадь только на Анадырской низменности и побережье залива Креста. На остальных участках побережья Тихоокеанских морей термокарстовые озера сосредоточены на узких полосах прибрежных равнин и в устьевых расширениях речных долин, где обычно развивается достаточно густая сеть очень небольших (0,1–0,3 км) озер.

Эталонный участок на северном побережье Пенжинской губы, в районе распространения аккумулятивных форм горного оледенения с лесотундровыми ландшафтами, находящийся в зоне прерывистого распространения ММП, имеет достаточно густую сеть малых озер (размером преимущественно 0,1–0,3 км, отдельные озера до 1 км). При сравнении снимков 1973 и 2001 гг. изменений озер не обнаружено.

Второй эталонный участок на побережье Удской губы Охотского моря, на левобережных террасах р. Уды вблизи ее устья, со среднетаяжными лесами, находится в самой южной части зоны островного распространения ММП. Здесь характерна густая сеть малых термокарстовых озер размерами 0,1–0,2 и 0,5 км. При сравнении



Рис. 7. Изменения распространения термокарстовых озер на участке Яно-Индигирской низменности (1972–2000 гг.).

1 – вода в 1972 и 2000 гг.; 2 – суша в 1972 г., вода в 2000 г.; 3 – вода в 1972 г., суша в 2000 г.

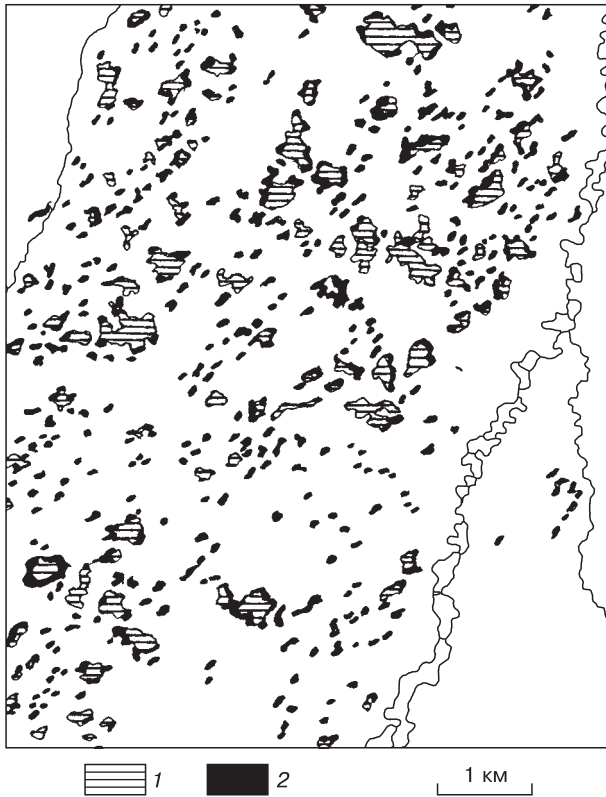


Рис. 8. Изменения распространения термокарстовых озер на участке побережья Удской губы (1973–2001 гг.).

1 – вода в 1973 и 2001 гг.; 2 – суша в 1973 г., вода в 2001 г.

снимков 1973 и 2001 гг. обнаружено увеличение площади многих из существовавших озер и массовое появление новых малых (0,1–0,2 км) озер (рис. 8).

В *Забайкалье*, в южной части зоны развития ММП, термокарстовые озера распространены в межгорных впадинах байкальского типа. Для впадин характерно островное распространение ММП, термокарст здесь развит в крупных речных долинах, выполненных мощными толщами четвертичных отложений главным образом на речных террасах. Исследования выполнены на двух эталонных участках.

Участок в *Верхнеангарской впадине* находится в 100 км к северо-востоку от оз. Байкал, в долине Верхней Ангары, на ее левом берегу с аллювиальным рельефом, многочисленными протоками, старицами, с южно-таежными ландшафтами. Распространение мерзлых пород редкоостровное. Термокарстовые озера небольших размеров (0,1–0,2 км, отдельные 0,5–1 км) образуют достаточно густую сеть. При сравнении снимков 1979 и 2002 гг. здесь обнаружены существенные изменения (рис. 9). Часть относительно крупных озер оказались спущенными и превратились в

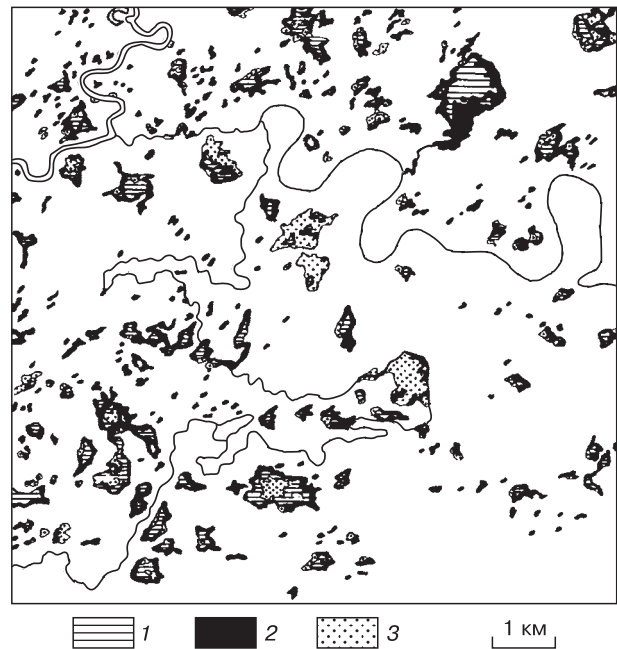


Рис. 9. Изменения распространения термокарстовых озер на участке Верхнеангарской впадины (1979–2002 гг.).

1 – вода в 1979 и 2002 гг.; 2 – суша в 1979 г., вода в 2002 г.; 3 – вода в 1979 г., суша в 2002 г.

обсохшие котловины. В нескольких относительно крупных озерах оказалась осушенной их центральная часть, возможно, здесь образовались бугры или площади пучения, а оставшиеся водоемы, отнесенные к бортам котловин, приобрели кольцевую форму. Но наряду с таким уменьшением площади водной поверхности повсеместно наблюдается расширение ранее существовавших озер, а также возникновение большого числа новых озер малых размеров (0,1–0,2 км), в результате чего густота сети озер значительно увеличилась.

Второй участок в *Баргузинской впадине*, в 50 км восточнее оз. Байкал, охватывает левобережную террасу р. Баргузин с аллювиальным грядово-ложбинным пойменным рельефом, с южно-таежными ландшафтами и островным распространением мерзлых пород. Для этого участка характерна довольно разреженная сеть малых озер размерами 0,2–0,5 км. При сравнении снимков 1976 и 2000 гг. здесь обнаружены существенные изменения озер (рис. 10). Для наиболее крупных озер характерно осушение средней части озерных котловин, возможно, в связи с новообразованием ММП и превращение этих озер в кольцевые. Но наряду с этим произошло расширение большинства озер по периметру и появление большого количества малых озер размерами 0,1–0,2 км, так что сеть озер на этом участке значительно сгустилась.

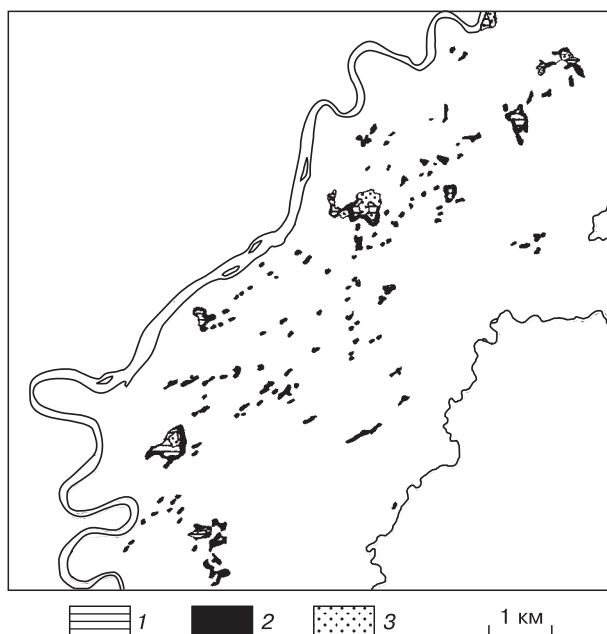


Рис. 10. Изменения распространения термокарстовых озер на участке Баргузинской впадины (1976–2000 гг.).

1 – вода в 1976 и 2000 гг.; 2 – суша в 1976 г., вода в 2000 г.; 3 – вода в 1976 г., суша в 2000 г.

Следует отметить, что на обоих участках в Забайкалье и на участке в Удской губе появившиеся озера очень малы, и учитывая, что при сравнении разновременных снимков приходится пользоваться снимками разного разрешения (80 м для системы MSS, действовавшей в 1970-х–начале 1980-х гг., и 30 м для системы ЕТМ+, начавшей работать в 1999 г.), не исключается влияние неоднородности сравниваемых снимков. Поэтому очень интересные выявленные тенденции изменений в южных районах Сибири требуют проверки с использованием аэросъемочных материалов более высокого разрешения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение космических снимков, полученных в 1970-х–начале 1980-х гг., с современными снимками начала 2000-х гг., выполненное на 19 эталонных участках, выбранных в различных геокриологических и ландшафтных условиях, показало, что на большей части зоны распространения ММП в России существенных изменений в распространении термокарстовых озер и их размерах не произошло. На 60 % эталонных участков при сравнении разновременных снимков с 20–30-летним интервалом не было обнаружено никаких изменений. На восьми участках из 19 зафиксированы изменения площади термокарстовых озер, которые в разных районах носят

разнонаправленный характер. На четырех эталонных участках, расположенных в северной геокриологической зоне (сплошного распространения ММП), отмечено уменьшение количества и площади термокарстовых озер в результате эрозийной деятельности: часть озер была спущена водотоками с образованием полностью безводных котловин – хасыреев, либо произошло уменьшение площади кольцевых озер вдоль бортов термокарстовых котловин. Такие процессы наиболее ярко проявились на Южном Ямале, левобережье Пура, правобережье Енисея. В отдельных случаях осушение котловин сочетается с заполнением водой ранее существовавших хасыреев в результате деятельности водотоков так же, как это произошло на участке Яно-Индибирской низменности.

Иной характер изменений выявлен на четырех эталонных участках в более южной части территории страны (южнее 65° с.ш.), которые относятся как к северной геокриологической зоне (Центральная Якутия), так и к южной (впадины Забайкалья, побережье Удской губы). В Центральной Якутии отмечено значительное (двукратное) увеличение площади термокарстовых озер, которые, расширившись, заняли аласные котловины. На двух участках в Забайкалье (Верхнеангарской и Баргузинской впадинах) обнаружено, с одной стороны, сокращение площади средних по размерам озер в связи с обсыханием их средних частей, а с другой стороны, отмечено повсеместное расширение площадей озер и образование многочисленных малых озер. Увеличение площади термокарстовых озер и появление новых малых озер выявлено и на Дальнем Востоке, на берегах Удской губы Охотского моря. Отметим, что по результатам анализа метеорологических данных именно в этих районах – в Центральной и Южной Якутии, Забайкалье, Приамурье – повышение температур воздуха за последние 30–35 лет достигает 1,4–1,8 °С и классифицируется как сильное [Павлов, Апаньева, 2004].

Обнаруженное на нескольких участках увеличение площади термокарстовых озер и появление новых озер как в северной (Центральная Якутия), так и в южной геокриологических зонах должно привлечь внимание мерзлотоведов. Необходим анализ возможных причин изменения площади озер с привлечением материалов гидрометеорологических и геокриологических наблюдений. Поскольку разрешение сопоставлявшихся космических снимков со спутника Landsat 1970-х и 2000-х гг. различно (сканирующая система MSS на первых спутниках в 1970-х гг. имела разрешение 80 м, а система ЕТМ+ в 2000-х гг. – 30 м), а малые размеры озер находятся на грани разрешения, целесообразна дополнительная проверка полученных результатов по материалам лучшего разрешения с привлечением аэрофотоснимков и с

использованием материалов съемки для нескольких временных срезов, по которым можно было бы восстановить ход процесса.

Из результатов наших работ, проведенных с широким охватом ландшафтных и геокриологических условий, следует также, что выводы американских и западно-сибирских исследователей об увеличении площади термокарстовых озер в северной геокриологической зоне Западной Сибири и уменьшении в южной [Кирпотин и др., 2008; Smith et al., 2005] не могут быть распространены на северную и южную геокриологические зоны на всей территории России, для ряда районов которой выявлены противоположные тенденции. Для их объяснения требуются дальнейшие исследования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-05-00187) и по проекту НШ (№ 05-08-00171).

Литература

- Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. М., Изд-во РАН, 1997, 398 с.
- Брыксина Н.А., Евтюшкин А.В., Полищук Ю.М. Изучение динамики изменений термокарстовых форм рельефа с использованием космических снимков // Тезисы докл. 4-й Всерос. открытой конф. "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, ИКИ РАН, 13–17 нояб. 2006 г. (CD ROM).
- Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001, 262 с.
- Геокриология СССР. Т. 1. Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1988, 357 с.
- Данилова Н.С. Криогенные процессы и образования // Геокриологические условия Средней Сибири. М., Наука, 1974, с. 125–135.
- Данилова Н.С., Фотиев С.М. Термокарстовые процессы и образования // Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, с. 118–120.
- Днепровская В.П., Полищук Ю.М. Геоинформационный анализ геокриологических изменений в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири с использованием космическим снимков // Геоинформатика, 2008, № 2, с. 9–14.
- Качурин С.П. Термокарст на территории СССР. М., Изд-во АН СССР, 1961, 291 с.
- 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. Том. гос. ун-та, 2008, № 311, с. 185–189.
- Павлов А.В., Ананьева Г.В. Оценка современных изменений температуры воздуха на территории криолитозоны России // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 2, с. 3–9.
- Прогасьева И.В. Аэрометоды в геокриологии. М., Наука, 1967, 196 с.
- Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. М., Изд-во Моск. ун-та, 1993, 334 с.
- Суходровский В.Л. Экзогенное рельефообразование в криолитозоне. М., Наука, 1979, 280 с.
- Fitzgerald D., Riordan B.A. Permafrost and ponds. Remote sensing and GIS used to monitor Alaska wetlands at the landscape level // Agroborealis, 2003, vol. 35, No. 1, p. 30–35.
- Smith I.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic lakes // Science, 2005, vol. 308, No. 5727, p. 1429.

Поступила в редакцию
30 июня 2008 г.