
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР СЕВЕРО-ВОСТОКА ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

© 2011 г. В. В. Елсаков, И. О. Марущак

Учреждение Российской академии наук Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар
E-mail: elsakov@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 08.07.2010 г.

Выявлены основные тренды изменений термокарстовых озер в широтном градиенте распределения многолетнемерзлых пород (ММП) на Европейском Северо-востоке России по спутниковым изображениям периода 1973–2009 гг. Максимальное проявление наблюдаемых изменений на модельных участках районов прерывистого и островного размещения ММП (до 80%) относится к периоду 1973–1988 гг. и связано с дренированием озер. Районы сплошного распространения ММП в этот период сохраняли большую устойчивость к изменениям, для них максимальные изменения количества озер приходятся на более поздние сроки 1988–2002 гг. Тенденция к снижению интенсивности изменений показателя прослеживается на всех участках после 2002 г. Интенсивность выявленных изменений падает к южным границам криолитозоны.

Ключевые слова: динамика термокарстовых озер, спутниковый мониторинг, климатические изменения

ВВЕДЕНИЕ

Изменение количества и площадей зеркал термокарстовых озер в областях распространения многолетнемерзлых пород (ММП) в большинстве случаев связывается с региональными и глобальными климатическими трансформациями и воспринимается многими исследователями в качестве одного из интегрирующих показателей, демонстрирующих интенсивность и направленность проявления криогенных процессов. Такие исследования широко проведены в Арктическом регионе на территории Скандинавии (Luoto, Seppälä, 2003), Западной Сибири (Smith et al., 2005; Брыскина и др., 2005; Днепровская и др., 2009), Аляски (Fitzgerland, Rioridan, 2004; Robert et al., 2005), Канады (Vallée, Payette, 2007). Обобщения на межрегиональном уровне, выполненные для территории России (Кравцова, Быстрова, 2009), показывают существенные различия в протекании процессов, что связывается исследователями с неоднородностью геокриологической зоны, развитием эрозионных процессов, антропогенным влиянием. Несмотря на широкомасштабные по географическому охвату исследования, однозначных заключений в оценке интенсивности и направленности проявления данных процессов не наблюдается, что обусловлено как географическим своеобразием сравниваемых регионов, так и методологическими подходами, используемыми в проведении данного рода сравнений. В числе последних: построение алгоритмов выявления изменений преимущественно по изображениям, полученным только для крайних лет на-

блюдений, использование при сравнении сенсоров различного разрешения и диапазонов электромагнитного спектра, методик предварительной обработки изображений.

Между тем результаты исследований интенсивности и направленности процессов изменений криогенных ландшафтов активно принимаются во внимание при проектировании и строительстве инженерных сооружений и коммуникаций (инженерно-геологические условия территории), представляющих экологическую опасность. Особенности распределения ММП активно учитываются при анализе распределения нефтяных загрязнений в слое сезонного оттаивания (Ананьева и др., 2003), построении моделей эмиссии и потребления парниковых газов арктическими экосистемами и возможных смещений баланса углерода под влиянием климатических изменений.

Цель настоящего исследования заключалась в: 1) разработке алгоритмов выявления изменений термокарстовых озер по материалам спутниковых изображений высокого разрешения Landsat; 2) выполнении учета их количества и площади зеркал для трех временных периодов разной продолжительности, ограниченных датами съемки, выполненной в 1973 (1974) г.–1988 (1989) гг., 2000–2002 гг. и 2007–2009 гг. в широтном градиенте распределения ММП; 3) выявлении основных наблюдаемых трендов изменений за анализируемый период.

Таблица 1. Использованные материалы спутниковой съемки на модельные участки

Участки	Временные интервалы			
	1973–1974	1988	1999–2002	2007–2009
“Югорский”	25.06.1973	05.08.1988	27.07.2002	16.08.2009
“Каратаиха”		11.07.1988	21.07.2000	13.07.2009
“Воркута”	25.06.1973	13.07.1988	07.07.2000	03.07.2007
“Харьяга”	22.06.1974	11.07.1988	26.06.2000	29.06.2007
“Инта”	25.06.1973	27.06.1988–13.07.1988	03.07.1999	01.07.2007

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основными материалами, использованными в анализе трендов изменения количества и площади зеркал термокарстовых озер, стали временные серии изображений 1973–2009 гг., полученные при съемке высокого разрешения Landsat (радиометры MSS, ТМ и ЕТМ+) (табл. 1), и подобранные для пяти модельных участков, различающихся по мерзлотным условиям (рис. 1). Выбор и форма модельных участков определялись доступностью сцен, полученных из свободных архивов, расположением участка в градиенте широтных условий распространения ММП (сплошное, массивно-островное и прерывистое) и геоботанических зон, отсутствием в пределах сцен облачного покрова. Последнее условие является особо важным, поскольку большую часть дней в году для наблюдаемой территории составляют периоды с полярным и пасмурным состоянием неба. К примеру, для территории Ненецкого автономного округа вероятность пасмурного состояния неба – по данным метеостанции Пустозерск (Нарьян-Мар) – в среднем варьирует от 62% в июле до 78% в сентябре (Климатологический..., 1932).

Привлечение изображений разных лет позволило охватить три временных периода протяженностью в 14–15 лет (1973(1974)–1988 гг.); 12–14 лет (1988–2000(2002) гг.) и 7–9 лет (2000–2007(2009) гг.).

Обработка снимков, перевод растровых элементов изображения в векторные объекты, организация, подготовка и аналитическая обработка пространственно-совмещенной базы данных водных объектов были выполнены с использованием программных пакетов Erdas Imagine 9.0 и ArcView 3.3. Выделение водных объектов на рассматриваемых изображениях после процедуры географической привязки проводились по генерированным значениям шкал “Brightness”, “Greenness” и “Wetness” преобразования Tasseled Cap (ТС) с использованием общепринятого (King, 2001; Huang, 2001) отношения

$$“Br, Gr, W” = aD_1 + bD_2 + cD_3 + dD_4 + eD_5 + fD_7, \quad (1)$$

где “Br, Gr, W” – значения соответствующих шкал; $D_1–D_7$ – величины отраженного излучения соответ-

ственно для каналов снимков Landsat; $a–f$ – коэффициенты преобразования ТС для сенсоров ЕТМ+ и ТМ.

Полученные значения обработаны с использованием принципов декомпозиции спектральных смесей (метод SMA – Spectral Mixed Analysis), исходя из положения, что спектр каждого пиксела есть линейная комбинация спектров “чистых компонент” (Барталев и др., 2009). Это допущение позволяет количественно оценить вклад отдельных компонент в отражательную способность элементов изображения. В качестве “чистых компонент” использованы контрастные по спектральным характеристикам объекты: водные поверхности, растительный покров, лишенные растительности участки. Общий принцип оценки доли отдельных компонент для линейного смешивания спектров проводили согласно выражения

$$DN_c = \sum_{i=1}^n F_i DN_{i,c} + E_c, \quad (2)$$

учитывая ограничения

$$\sum_{i=1}^n F_i = 1 \quad 0 \leq F_i \leq 1, \quad (3)$$

где DN_c – числовое выражение значения пиксела в канале c ; F_i – доля i -го эталона в смеси; $DN_{i,c}$ – числовое выражение значений i -го эталона в канале c ; n – количество эталонов; E_c – ошибка оценки для канала c .

Проведение SMA-преобразования позволило получить однозональный тематический растр, где выделенная водная компонента варьировала от 0 (отсутствие воды) до 100% (полностью водная поверхность). Анализ площадей водных поверхностей модельного участка Воркутинской тундры, выполненный по спектральному изображению QuickBird (2.44 м) и Landsat ТМ одного сезонно-временного периода (03.07.2007 и 07.07.2007), показал, что максимальная сходимость площадей водных поверхностей между изображениями достигается при выборе порогового значения доли площади компоненты воды, полученной при SMA анализе снимков Landsat ТМ, выше 0.48. При вы-

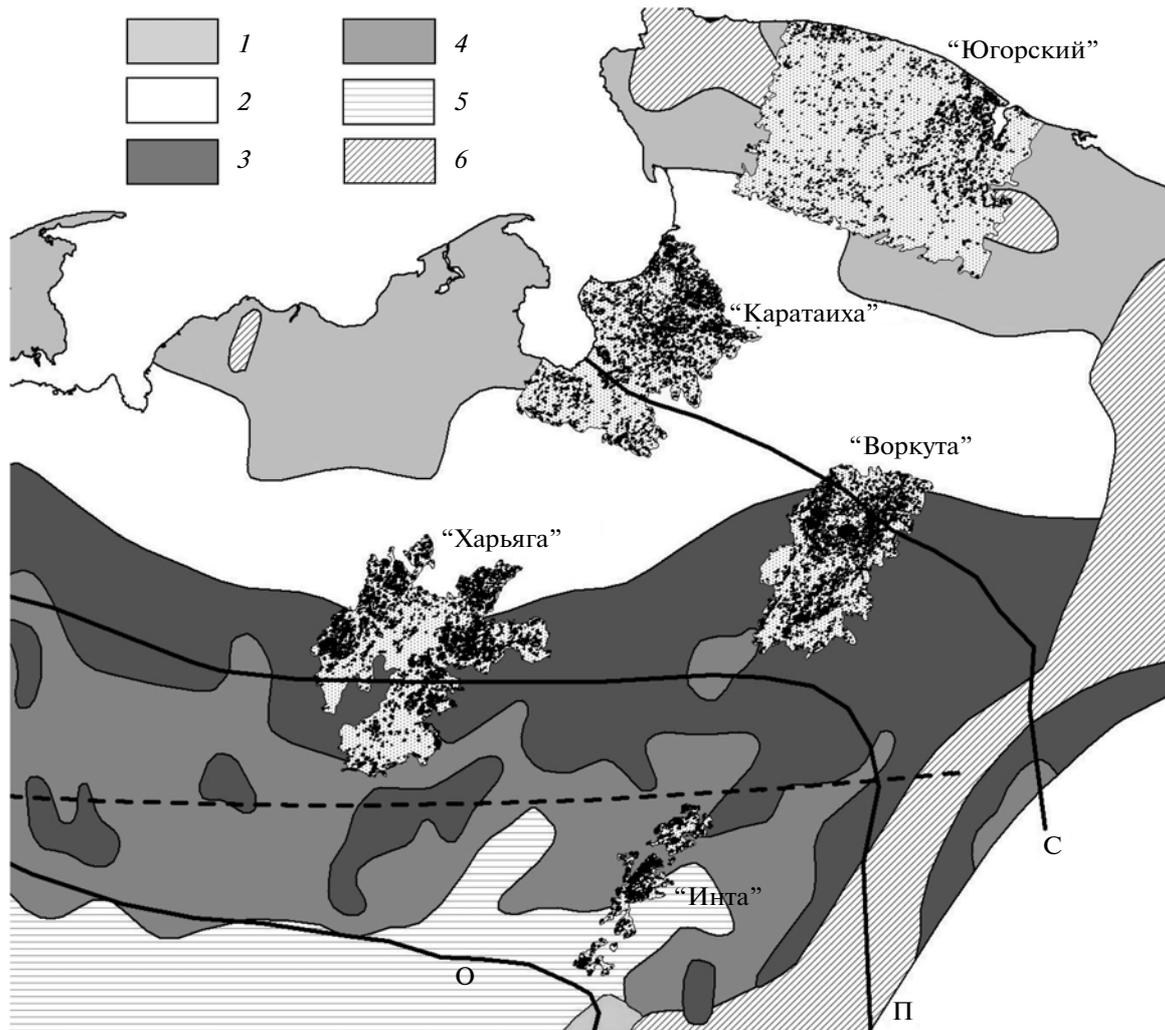


Рис. 1. Локализация участков проведения работ в пределах территории. Представлены участки выполнения работ и их названия, используемые в тексте, границы распространения сплошных (С), массивно-островных (О) и прерывистых (П) ММП. Обозначения геоботанических зон: 1 – северные типичные тундры; 2 – мелкоерниковые южные кустарниковые тундры; 3 – крупноерниковые южные (кустарниковые) тундры; 4 – предтундровые редколесья в сочетании с южными тундрами; 5 – зона крайне-северной тайги; 6 – горные тундры и редколесья.

делении пикселей водных поверхностей принимали во внимание элементы изображения, в которых содержание “водной компоненты” превышало 0.48, остальные элементы отсекали и в дальнейшем анализе и обработке не использовали. Сопоставление значений площадей озер для опорного (Quick-Bird) и контрольного (Landsat TM) изображений демонстрирует высокий уровень согласованности результатов, полученных из независимых источников (рис. 3). Сравнительный анализ величин площадей озер, полученных по данным изображениям, показал, что увеличение размеров наблюдаемых озер приводит к росту точности определения показателя. Для озер с площадью более 0.01 км² погрешность определения составила 15%, более 0.03 км² порядка 10%. Для озер с размерами менее 0.01 км² значения

показателя увеличивались до 70%. Поэтому в дальнейшем для сравнения модельных участков преимущественно использовали озера с размерами зеркала более 0.01 км².

Полученные серии снимков стали основой для присвоения элементам изображения, составляющим разделенные водные объекты, персональных идентификаторов (ID), расчета средних значений доли водной поверхности для отдельных водных объектов, векторизации и учета площадей озер, организации реляционной базы данных по озерам модельных участков.

Для выполнения обозначенных процедур составляли бинарные (вода/не вода), пространственно совмещенные разногодовые многослойные серии. Перекрывающиеся водные объекты разновре-

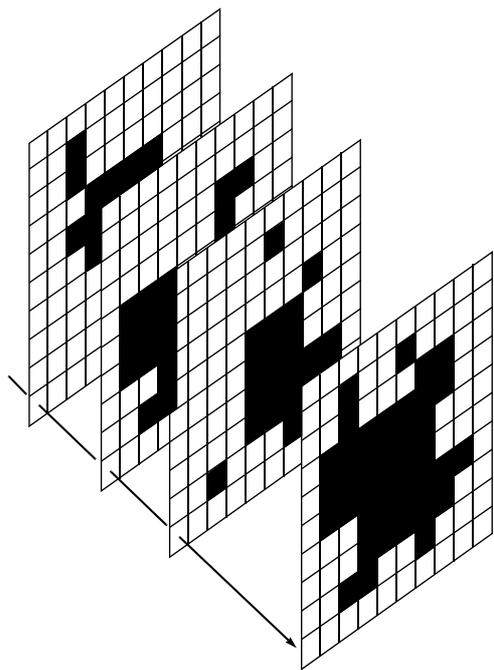


Рис. 2. Формирование общей маски озера по перекрывающимся разновременным изображениям при присвоении идентификационного номера.

менных сцен позволили подготовить общую маску отдельных озер (рис. 2). Сформированным водным объектам итоговой маски с помощью операции объединения (“Clump” из набора Interpreter пакета Erdas Imagine 9.0) присваивался *ID*, в результате чего его получил каждый пиксел обособленного водного объекта. Построенная маска далее была использована для решения обратной задачи – присвоения *ID* отдельным озерам изображений разных лет, перекрывающихся с общей маской.

Полученные изображения с присвоенными значениями *ID* были использованы при расчете среднего значения доли водной компоненты для отдельных озер по материалам SMA-анализа (функция расчета “зонального среднего” в Erdas Imagine 9.0). После этого водные объекты разногодовых изображений были векторизованы, на их основе с помощью модуля X-Tools (ArcView 3.3) проведен учет площадей озер-полигонов, исключены объекты-водотоки (реки, ручьи) и видимые “шумы” визуальной экспертной обработкой.

В качестве показателя изменений площади озер был предложен к использованию Нормализованный разностный индекс поверхности зеркала озер (Normalized Differences Lake Surfaces Index, NDLSI), выраженный как

$$\text{NDLSI} = (S_1 - S_2) / (S_1 + S_2), \quad (4)$$

где S_1 and S_2 – площади зеркал озер на период наблюдаемых лет. Крайние значения величин индекса в пределах от -1 до 1 демонстрируют полное исчезновение или новообразование озер соответственно. Полученные величины позволяют наглядно оценить интенсивность и направленность процессов изменения водоемов, дать количественную оценку этим изменениям.

Итогом выполненной работы являлась пространственно-организованная база данных, включающая в себя полигональные объекты – векторные слои зеркал озер модельных участков и связанную с ними через *ID*-базу атрибутивных данных, – в которой были представлены следующие характеристики: номер персонального идентификатора, скорректированная площадь поверхности для каждого года съемки, значения NDLSI для разных временных интервалов.

Для удобства количественного учета все озера были разбиты на классы по площади поверхности

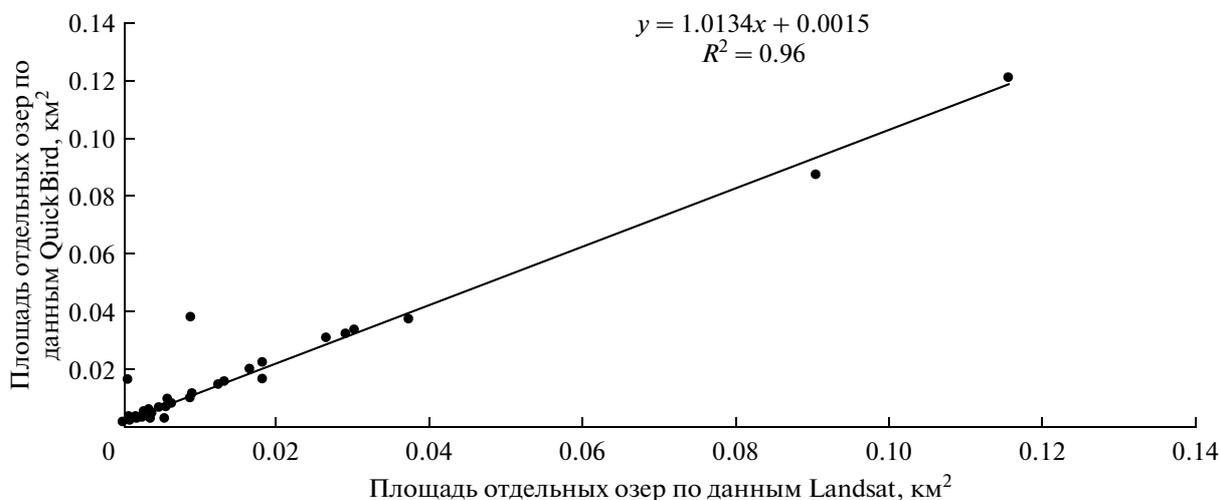


Рис. 3. Сравнение площадей выделенных озер по данным Landsat TM и QuickBird.

зеркал (Голдина, 1972): $<0.01 \text{ км}^2$, $0.01\text{--}0.05 \text{ км}^2$, $0.05\text{--}0.1 \text{ км}^2$, $0.1\text{--}0.5 \text{ км}^2$, $0.5\text{--}1 \text{ км}^2$, $>1 \text{ км}^2$. В качестве изменившегося озера понимали полное его дренирование или значительное изменение его площади (более чем в 4 раза – $\text{NDLSI} < 0.6$) (рис. 4.), при этом, принимали, что “исчезнувшие” озера не появлялись повторно на последующих изображениях, что снизило вероятность ошибки из-за сезонных изменений, особенно актуальной для озер с небольшой глубиной.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общая характеристика распределения озер на модельных участках

Тундровые озера востока Большеземельской тундры разнообразны по очертаниям и размерам, но среди них преобладают небольшие озера площадью менее 0.1 км^2 (Голдина, 1972), что позволяет отнести исследуемый регион к районам повсеместного распространения преимущественно малых и средних озер (Кравцова, Быстрова, 2009). Представленность озер на участках неравномерная, показатели озерности в пределах модельных территорий варьируют от 2.6 до 13.4% при среднем значении 7.9% (табл. 2). В целом полученные показатели отражают отмеченную ранее закономерность распределения озер на территории восточной части Большеземельской тундры (Голдина, 1972), связанную с тектоническим строением территории: наблюдается увеличение числа озер с востока на запад

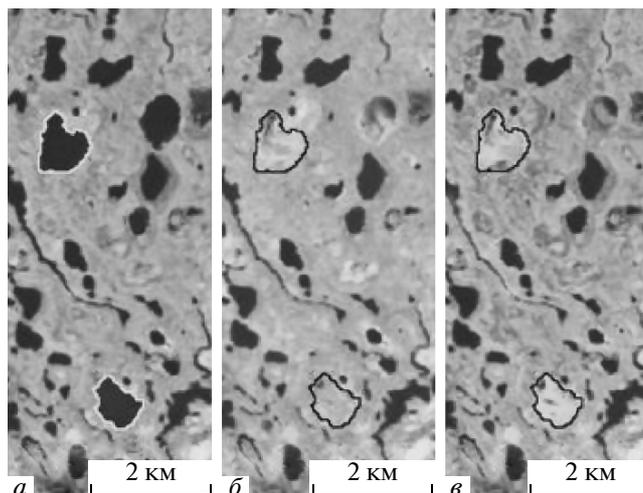


Рис. 4. Пример дренирования озер во временном интервале 1988–2000 гг. на участке “Каратаиха”: а – 11.07.1988, б – 21.07.2000 и в – 13.07.2009.

и с юга от р. Уса к центральной части. Далее на север к морскому побережью озерность территории уменьшается. Полученные величины площадей водной поверхности озер в пределах отдельных территорий могут быть достаточно важными показателями, в частности, при анализе роли термокарстовых озер в формировании баланса парниковых газов модельных участков. Так, эмиссия углерода за весь летний период наблюдений 2001 г., измеренная нами для озер Воркутинских тундр, составила 517.5 кг/км^2 (Heikkinen et al., 2003).

Таблица 2. Общая характеристика участков выполнения работ

№	Название модельного участка, характеристика	Тип ММП	S , км^2	S_{O_3} , км^2	K_{O_3} , %
1	“Югорский” – сев. часть Югорского п-ова, охватывает нижнюю часть басс. р. Кара, расположен в пределах геоботанической зоны северных типичных тундр с доминированием моховых лишайниковых и полигональных тундр, с юга переходит в горные тундры Пай-Хоя.	С	10491.4	245.1	2.34
2	“Каратаиха” – участок басс. р. Морею (западная часть) и р. Коротайха (восточная часть), относящийся к приморской части территории с мелкоерниковыми южными (кустарниковыми) тундрами.	С-О	5370.6	344.6	6.42
3	“Воркута” – участок басс. р. Уса (северная часть) и Коротайха (южная часть), с доминированием крупноерниковых южных (кустарниковых) тундр.	П	4130.3	325.4	7.88
4	“Харьяга” – Участок басс. р. Колва и р. Адзьва (западная часть), расположен в границах крупноерниковых и мелкоерниковых подзон южных (кустарниковых) тундр.	О-П	5809.1	458.6	7.89
5	“Инта” – Участок водораздела басс. р. Косью (северная часть) и р. Уса (южная часть), включает приграничные территории между зонами предтундровых редколесий в сочетании с южными тундрами (сев. часть) и участки крайне-северной тайги (южная часть).	О	962.4	109.8	11.4

Примечание. Сокращенные обозначения ММП: границы распространения сплошных (С), массивно-островных (О) и прерывистых (П) ММП. S – общая площадь модельной территории (км^2); S_{O_3} – площадь водной поверхности озер (км^2); K_{O_3} – коэффициент озерности (%).

Таблица 3. Общая характеристика водоемов территории

Модельный участок	Характеристики	Классы озер по размерам зеркал поверхности, км ²					
		>1	1–0.5	0.5–0.1	0.1–0.05	0.05–0.01	<0.01
“Югорский”	количество озер, н/в % к общему	$\frac{18}{0.31}$	$\frac{48}{0.82}$	$\frac{472}{8.06}$	$\frac{534}{9.12}$	$\frac{2171}{37.1}$	$\frac{2612}{44.6}$
	площадь озер, км ² /% к общей площади озер	$\frac{31.7}{12.9}$	$\frac{31.9}{13.0}$	$\frac{91.5}{37.3}$	$\frac{34.1}{13.9}$	$\frac{44.6}{18.2}$	$\frac{11.3}{4.6}$
“Каратаиха”	количество озер, число/в % к общему	$\frac{9}{0.058}$	$\frac{69}{0.45}$	$\frac{746}{4.84}$	$\frac{833}{5.40}$	$\frac{3498}{22.7}$	$\frac{10256}{66.5}$
	площадь озер, км ² /% к общей площади озер	$\frac{12.2}{3.6}$	$\frac{42.3}{13.6}$	$\frac{138.2}{42.6}$	$\frac{54.4}{16.5}$	$\frac{72.8}{21.9}$	$\frac{24.7}{7.5}$
“Воркута”	количество озер, число/в % к общему	$\frac{24}{0.26}$	$\frac{36}{0.38}$	$\frac{525}{5.61}$	$\frac{641}{6.84}$	$\frac{2839}{30.3}$	$\frac{5305}{56.6}$
	площадь озер, км ² /% к общей площади озер	$\frac{112.3}{34.5}$	$\frac{20.5}{6.3}$	$\frac{85.6}{26.3}$	$\frac{39.5}{12.1}$	$\frac{53.3}{16.3}$	$\frac{14.3}{4.4}$
“Харьяга”	количество озер, число/в % к общему	$\frac{76}{0.81}$	$\frac{111}{1.18}$	$\frac{703}{7.48}$	$\frac{563}{5.98}$	$\frac{2213}{23.5}$	$\frac{5737}{61.0}$
	площадь озер, км ² /% к общей площади озер	$\frac{168.0}{36.6}$	$\frac{68.4}{14.9}$	$\frac{132.1}{28.8}$	$\frac{34.3}{7.47}$	$\frac{41.9}{9.13}$	$\frac{14.0}{3.06}$
“Инта”	количество озер, число/в % к общему	$\frac{17}{0.39}$	$\frac{15}{0.35}$	$\frac{130}{3.01}$	$\frac{138}{3.19}$	$\frac{767}{17.8}$	$\frac{3254}{75.3}$
	площадь озер, км ² /% к общей площади озер	$\frac{47.1}{42.9}$	$\frac{9.8}{8.96}$	$\frac{23.8}{21.7}$	$\frac{8.38}{7.64}$	$\frac{13.9}{12.7}$	$\frac{6.7}{6.1}$

На модельных участках отмечено присутствие значительного количества озер, имеющих не только термокарстовое (в большинстве), но и ледниковое, пойменное и др. происхождение. Нередко к классу водных объектов были отнесены участки водных поверхностей с незначительными размерами в пределах болотных комплексов, такие полигоны исключали из анализа в ходе визуального дешифрирования. Данные объекты характеризовались незначительными размерами. Основное скопление озер термокарстового происхождения приурочено к аккумулятивно-денудационным равнинам смешанного (морского, ледникового или водно-ледникового) происхождения, болотным аккумулятивным формациям плоских равнин, дренирующихся по краям участками пойм рек и ручьев водосборными проточными понижениями.

Термокарстовые типы озер образуют групповые скопления, имеют округлую форму (удлиненная, лопастная или овально-круглая) и небольшие размеры. На модельных участках чаще представлены

озера размером менее 0.01 км² (табл. 3), их доля в общем количестве озер превышает 57%, однако занимаемая поверхность незначительна (в среднем 4–6% всей площади). Наибольший вклад в показатель озерности вносят группы озер размером 0.5–0.1 км² (37–43% для участка “Югорский” и “Каратаиха”), для остальных участков – с размерами более 1 км² (более 34%). В связи с тем, что корректная визуальная оценка сравнительного состояния озер была ограничена разрешающей способностью использованного сенсора MSS, межгодовые изменения водных объектов выполняли для озер, имеющих площадь более 0.05 км².

*Межгодовая динамика водных поверхностей
модельных участков*

Основной тип питания водных объектов территории – снеговой со сравнительно небольшим участием дождевого питания (Атлас Арктики, 1985), в результате чего наибольший водный объем озера имеют в весенний период, когда их уровень на 0.2–0.5 м превышает меженные отметки (Голдина,

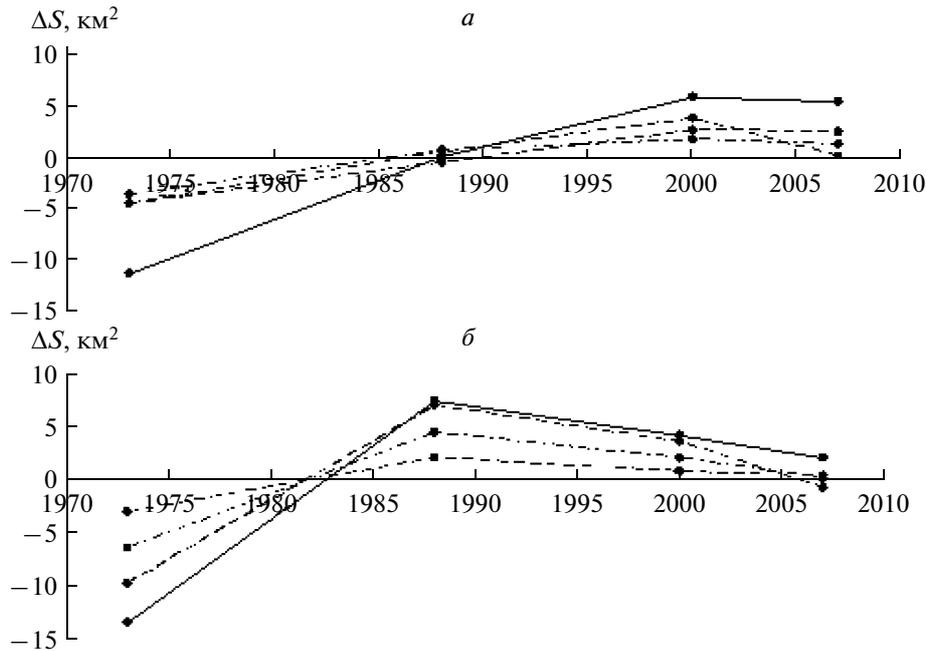


Рис. 5. Межгодовые изменения суммарной площади водной поверхности для озер разных классов, представленные относительно среднего межгодового значения (км^2) на участках “Воркута” (а), “Харьяга” (б). Условные обозначения классов озер, имеющих размеры: I – $0.05\text{--}0.1 \text{ км}^2$, II – $0.1\text{--}0.5 \text{ км}^2$; III – $0.5\text{--}1.0 \text{ км}^2$; IV – более 1.0 км^2 . ■ – I –♦– II –●– III –▲– IV.

1972). Для озер, расположенных на модельных участках, характерно разнонаправленное изменение размеров в течение разных сезонов/лет наблюдений. Это, с одной стороны, вызвано различиями во времени съемки, влияющими на изменение гидрологического режима в течение периода года и режима питания. Так, на примере о. Шпицберген показаны (Zwolicki et al., 2007) двукратное понижение уровня воды озера в первый летний период ($6.7\text{--}31.7$) и постепенное его повышение в 1.4 раза во второй половине ($31.7\text{--}30.8$). С другой стороны, причиной существенных различий было привлечение для сравнительного анализа данных Landsat разного разрешения (MSS и ETM/TM). Изменение суммарной водной площади отдельных классов озер на изображениях разных лет происходит синхронно в пределах рассмотренных участков и не имеет выраженных общих трендов. Даже на изображениях, полученных для периодов приближенных друг к другу дат, для разных участков наблюдаются разнонаправленные тренды изменений (рис. 5). Отмечено завышение показателя площади зеркал на сценах, по времени съемки приближенных к завершению периода снеготаяния и имеющих более низкое пространственное разрешение.

Изменение количества термокарстовых озер на модельных участках

Выбранные для анализа модельные участки имели разные размеры (отношение показателей $\frac{\text{макс}}{\text{мин}}$ площадей для рассмотренных участков составляло

11 раз), входили в состав ландшафтных районов, сложенных элементарными фациями, с варьирующими их соотношениями и комбинациями. На территории отмечено снижение числа озер за счет их дренирования и перехода в обезвоженные, иногда заболоченные хасыреи. Использование сцен данного разрешения и временного интервала не позволило выявить новообразований озер, возможно, имеющих незначительные по площади размеры и межгодовые увеличения ее прироста.

Наибольшее количество изменений за 36-летний период наблюдений (1973–2009 гг.) отмечено на участках “Харьяга” и “Каратаиха” (57 и 47 озер соответственно), более низкие значения отмечены для участков “Воркута” и “Югорский” (28 и 18), минимальное количество выявлено для участка “Инта” (два озера). Однако по представленности изменений на единицу площади рассмотренные участки могут быть выстроены в следующий ряд (по убыванию показателя): “Харьяга” ($0.98 \text{ оз}/\text{га}$) → “Каратаиха” ($0.87 \text{ оз}/\text{га}$) → “Воркута” ($0.68 \text{ оз}/\text{га}$) → “Инта” ($0.42 \text{ оз}/\text{га}$) → “Югорский” ($0.17 \text{ оз}/\text{га}$). Анализ представленности изменений на общее количество озер учтенной группы с зеркалом поверхности более 0.05 км^2 позволяет получить схожий ряд: “Харьяга” (3.0% от рассмотренных озер) → “Каратаиха” (2.8%) → “Воркута” (2.3%) → “Югорский” (1.7%) → “Инта” (0.7%).

Наибольшие изменения в выделенных группах озер в пределах модельных участков наблюдали для

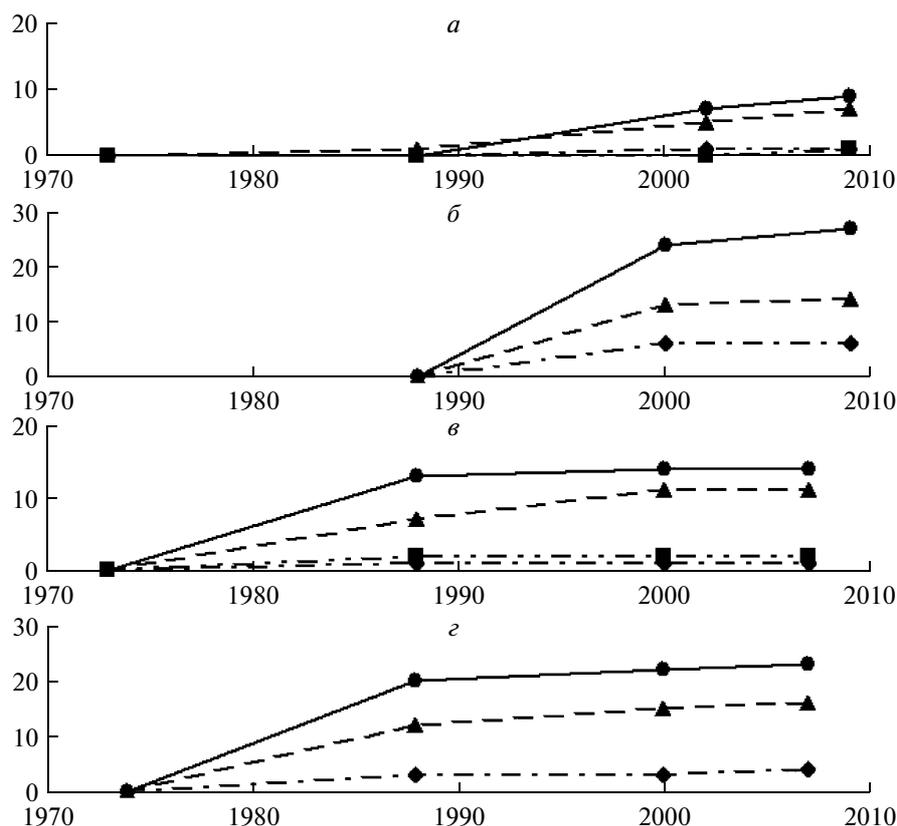


Рис. 6. Накопление изменений в разных группах озер за период наблюдений 1973–2009 гг.: *а* – “Югорский”, *б* – “Каратайха”, *в* – “Воркута”, *з* – “Харьяга”. По оси ординат – количество дренированных озер, абсцисс – годы съемки. Условные обозначения соответствуют рис. 5.

класса с размерами 0.1–0.5 км² (50–57%), менее изменчивыми были озера класса 0.05–0.1 км² (29–39%). Около 3–12% всех дренированных озер приходилось на группу 0.5–1 км². Изменения зеркал озер размерами более 1 км² отмечены на участке “Воркута” – два озера за временной интервал 1973–1988 гг. и “Югорский” – одно озеро за период 2002–2009 гг.

Анализ межгодовых изменений количества дренированных озер в пределах модельных участков, контрастно различающихся по типам залегания ММП, показал отсутствие синхронной динамики и большую сходимость в проявлении изменений для рядом расположенных районов.

Наименьшие изменения показателя отмечены на участке “Инта”, расположенном в пределах южной границы залегания ММП массивно-островного типа. На территории значимых изменений в анализируемых показателях за период 1973–2000 гг. не выявлено, отмечено дренирование двух озер за последовательные периоды 15- (1973–1988 гг.) и 12-летних наблюдений (1988–1999 гг.) (0.13 км² и 0.22 км²). Их близость к участкам с расположенными промышленными объектами позволяет предположить и возможную техногенную природу измене-

ний. Сходные с участком “Инта” результаты, характеризующиеся отсутствием видимых изменений, были получены и для показателей количества и размеров озер за периоды 1988–2000 и 1980–2001 гг. территории правобережья р. Мезень (южнее границы ММП) и участка в нижнем течении р. Печора, расположенном в зоне массивно-островного распространения ММП (Кравцова, Быстрова, 2009).

Основное количество изменений для периода наблюдений 1973(1974)–1988 гг. приходится на участки “Воркута” и “Харьяга”, расположенные в пределах границы прерывистого и островного расположения ММП (рис. 6). На данный временной интервал в 13 и 14 лет наблюдений соответственно приходится большая часть изменений озер: 82.1% всех отмеченных изменений озер участка “Воркута” и 61.4% участка “Харьяга”. Наибольшие изменения на рассмотренных участках испытывают озера с площадью зеркал 0.1–0.5 км² (35–46% от всех изменений). За следующий временной интервал 12 лет (1988–2000 гг.) количество изменений снизилось в 4.5 (“Воркута”) и 1.9 раза (“Харьяга”) и составило 17.9 и 31.6% изменений. В период 2000–2007 гг. интенсивность изменений продолжала снижаться до 7.0% на участке “Харьяга”, в Воркутинском районе изменений не было выявлено.

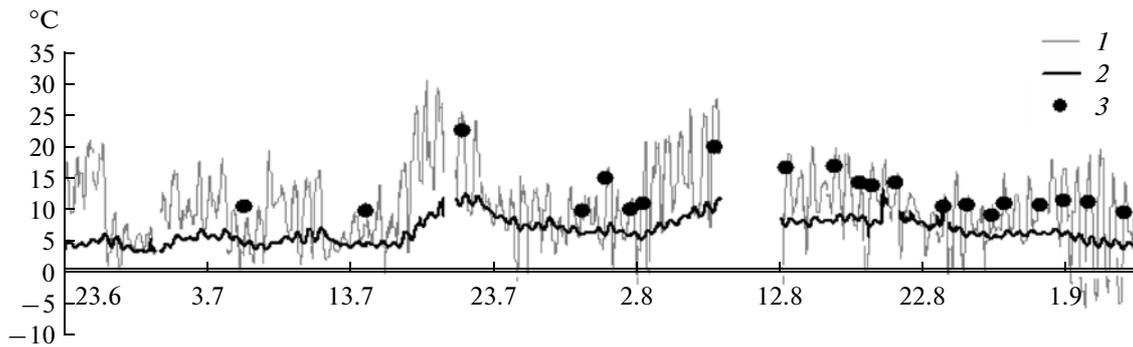


Рис. 7. Температурный режим приземного слоя воздуха (1), внутрипочвенной температуры берега на глубине 5–10 см (2) и температуры верхней толщи термокарстового озера Воркутинской тундры (3) для летнего периода наблюдений 2001 г.

Для районов, расположенных на участках сплошного залегания ММП, общий тренд изменений смещен во времени и связан с изменениями в период 1988–2000(2002) гг. Так, для участка “Югорский” выявленные в данный период изменения затронули до 66.7% всех дренированных озер. Снижение темпов изменений отмечено в последующий период 2002–2009 гг. (27.7%), при этом наименьшее их количество пришлось на период 1973–1988 гг. (5.6%). Для участка “Каратаиха” была доступна более короткая серия временных изображений, составленная с 1988 г. На 12-летний период (1988–2000 гг.) пришлось 91.5% изменений, из них наибольшее количество приходится на озера с размером зеркала 0.1–0.5 км² (51.1%). Период 2000–2007 гг. характеризовался снижением данного показателя до 8.5%.

Роль климатических показателей в изменении характеристик озер

Географическое размещение термокарстовых озер имеет унаследованный характер и отражает палеогеографическое прошлое Большеземельской тундры (Голдина, 1972) и современные процессы их трансформации. Среди наиболее важных причин, влияющих на изменение в расположении озер в районах распространения ММП, выделяются климатические условия, влияющие на мощность развития сезонно-талого слоя (СТС) и деградацию ММП, эрозионная деятельность вод, создающая возможность дренирования озер, или их комбинации (Шур, 1977; Кравцова, Быстрова, 2009). Однако современное наличие значительного количества термокарстовых озер на модельных участках демонстрирует протекание растянутых во времени процессов деградации ММП.

Рассмотренный временной промежуток 36 лет (1973–2009 гг.) позволяет установить общие тренды изменений территории, развивающиеся в настоящее время. Принятые в настоящей работе допущения связаны с тем, что отклонение интенсивности и направленности значений рассмотренных величин от средних межгодовых значений и их корреляция с наблюдаемыми изменениями климатических пока-

зателей характеризует процессы трансформации участков криолитозоны Европейского Севера. Относительно устойчивым показателем современных мерзлотно-климатических изменений является соотношение между трендами изменений температуры почвы и воздуха (Павлов, 2008).

Выполненные ранее обобщения по Западной Сибири (Днепровская и др., 2009), сделанные в результате анализа показателей изменения суммарной площади термокарстовых озер отдельных участков и индивидуальных озер, показали возможность их привлечения в качестве величин, характеризующих климатические изменения. Однако для рассмотренной в данной работе территории данные показатели не нашли возможности использования. Несмотря на то, что отклонение от средней многолетней величины уровня озер определяется преимущественно соотношением климатических факторов за эти годы и составляющими водного баланса (Голдина, 1972), различия, связанные с сезонными особенностями доступных периодов наблюдений, не позволяют выделить устойчивых межгодовых трендов изменений.

Среди водоемов рассмотренных участков преобладают мелководные термокарстовые озера, характеризующиеся хорошим перемешиванием вод по вертикали. Общий температурный режим толщи отражает общее поступление прямой солнечной радиации на земную поверхность и тесно коррелирует с температурой приземного слоя воздуха. Так, температура верхних толщ воды (20–30 см) достигает максимальных значений после нескольких, следующих друг за другом, периодов ежедневных прогреваний в июле (рис. 7). Водные толщи оказывают значительное тепляющее влияние на контактирующие с ними грунты, а интенсивность сезонного оттаивания определяется в данном случае чередованием и комбинацией следующих друг за другом периодов, благоприятствующих или препятствующих развитию термокарста.

Рассмотренный в работе временной период охватывает интервал 1973–2009 гг. Метеорологиче-

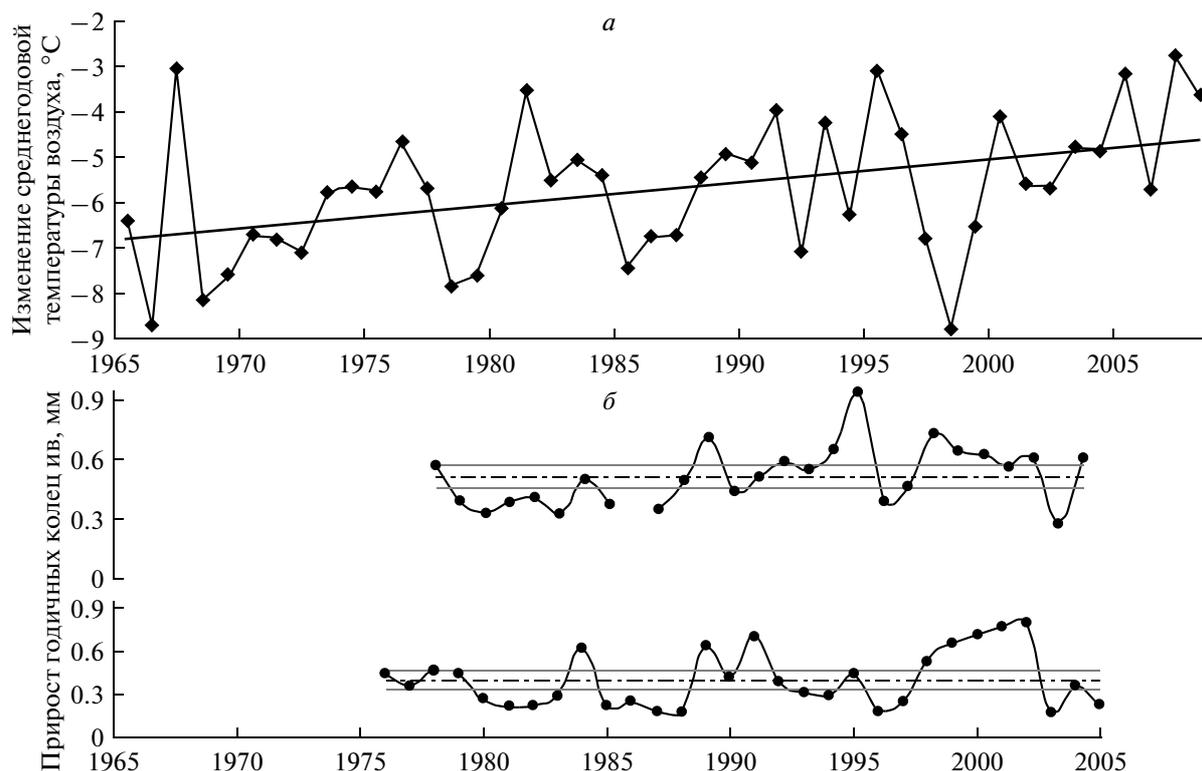


Рис. 8. Изменение среднегодовой температуры воздуха за период 1965–2008 гг.: *a* – общий тренд изменений параметра ($y = 0.05x - 6.85$; $R^2 = 0.18$); *б* – сравнение величин прироста годичных колец двух экземпляров ивы филиколистной из проточных депрессий термокарстовых озер (мм/год). Пунктиром обозначены средние значения, сплошной линией – доверительный интервал средних значений ($p = 0.95$).

ские наблюдения, выполненные для Европейского Северо-востока России, демонстрируют наличие тренда потепления, начинающегося во второй половине 1960-х – середине 1970-х гг., с наибольшей скоростью потепления в 1980-х гг. Во второй половине 1990-х гг., а также в 2001–2005 гг., потепление оценивается как очень слабое (Павлов, 2008; Мельников и др., 2007). Однако анализ метеорологических данных, полученных для метеостанции Воркута (База данных по климату Института биологии, сост. Г.Г. Мажитова), показывает наличие тренда увеличения среднегодовой температуры для всего периода наблюдений (рис. 8а).

По данным скважинных температурных измерений, современное потепление мерзлых грунтов распространяется до глубины 80–110 м (Мельников и др., 2007), при этом на примере Воркутинского района показано (Каунов, Павлов, 1997; Каунов, 1980), что периоды 1968–1972 гг. и 1995–1996 гг. представлены периодами наименьших и максимальных величин, ограничивающих диапазон варьирования температуры грунтов.

Согласно проведенного обобщения, выполненного для европейского северо-востока России (Природная..., 2005), минимальные температуры грунтов в слое годовых теплооборотов 10 м харак-

терны для района побережья северо-восточной части территории (участок “Югорский”) (см. рис. 9).

Развитие термокарста определяется величиной критической глубины СТС (Шур, 1977), при которой среднегодовая температура грунтов под слоем воды/растительного покрова равна нулю, при этом величина критической глубины снижается с продвижением на север. В силу данных особенностей участки северных территорий региона могут рассматриваться как сохраняющие большую устойчивость и инерционность в поддержании амплитуды температурного баланса грунтов. Совпадение “благоприятных” для развития термокарста условий в летний и зимний периоды или нескольких следующих друг за другом лет, способно оказать существенные изменения на глубину протаивания СТС. В частности, такие увеличения за период наблюдений могут быть связаны с периодами 1976–1977 гг., 1981–1984, 1989–1991, 1995–1996, 1998–2002 и 2003–2009 гг., для которых наблюдается превышение температурных показателей и количества осадков летнего периода над средними значениями. На данные временные периоды приходятся и превышающие средние значения прироста годичных колец ивы филиколистной, измеренные на приборе Lintab-5 (RINNTECH). Растения были собраны нами из локальных проточных депрессий участка с

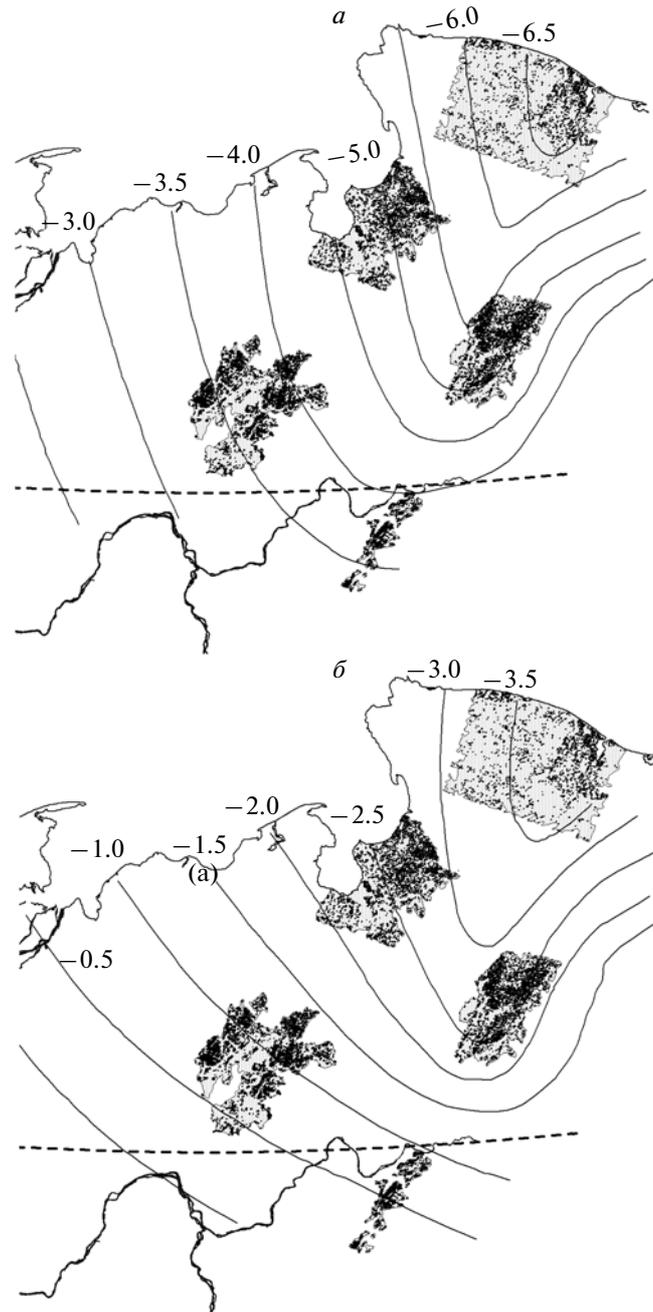


Рис. 9. Распространение на территории Европейского Северо-востока России минимальных температур грунтов в слое годовых теплооборотов 10 м: *a* – в период минимальных температур 1968–1972 гг., *б* – в период максимальных температур 1994–1996 гг. Представлены термоизогипсы на глубине 10 м. (Природная..., 2005).

термокарстовыми озерами (Воркутинская тундра окр. п. Седа) (рис. 8б, 8в). Несмотря на различия в амплитуде прироста, наблюдается синхронная реакция в отклике прироста в пределах отдельных лет наблюдений. Именно для периодов максимальных приростов возможны и максимальные появления изменений.

Среди рассмотренных показателей наиболее важным параметром, демонстрирующим измене-

ния термокарстовых озер на модельных участках, является величина количества и интенсивности дренирования озер за отдельные временные интервалы (рис. 6). Отсутствие новообразований озер на территории за рассмотренный период позволяет склониться к тому, что современный термокарст является преимущественно наследием более древних времен (Шур, 1977). Отсутствие полевых наблюдений на большинстве участков, прилегающих к дре-

нированным озерам, не позволяет оценить роль локальных факторов в их формировании, а корреляция с данными температурных наблюдений воздуха и грунтов, подтверждает климатическую природу наблюдаемых изменений.

Ответная реакция криолитозоны на потепление, наблюдаемая на основании анализа интенсивности дренирования термокарстовых озер, позволяет установить внутрорегиональные различия, связанные с ее ослаблением в широтно-долготном градиенте по направлению от массивно-островной зоны к южным границам распределения ММП и запаздыванием временного отклика в направлении распределения прерывистых–сплошных ММП. Наибольшее проявление изменений проявилось на участках прерывистых и островных ММП в 1973–1988 гг. Обращает на себя внимание отсутствие тренда дальнейшего роста количества дренированных озер для рассмотренных участков.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ “Влияние климатических изменений на биоценозы ненарушенных территорий российского Севера” (проект № 10-04-92514-ИК_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьева Г.В., Дроздов Д.С., Инстанес А., Чувилин Е.М.* Нефтяное загрязнение слоя сезонного оттаивания и верхних горизонтов многолетнемерзлых пород на опытной площадке “мыс Болванский” в устье р. Печора // Криосфера Земли. 2003. Т. VII. № 1. С. 49–59.
- Атлас Арктики.* М.: ГУГК при СМ СССР, 1985. С. 97–98.
- Барталев С.А., Ховратович Т.С., Елсаков В.В.* Использование спутниковых изображений для оценки потерь углерода лесными экосистемами в результате вырубок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Вып. 6. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2009. С. 343–352.
- Брыскина Н.А., Евтюшкин А.В., Полищук Ю.М.* Изучение динамики изменений термокарстовых форм рельефа с использованием космических снимков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Вып. 4. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2007. С. 123–128.
- Голдина Л.П.* География озер Большеземельской тундры. Л.: Наука, 1972. 102 с.
- Днепровская В.П., Брыскина Н.А., Полищук Ю.М.* Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 4. С. 88–96.
- Какунов Н.Б.* Климатические изменения и динамика водно-тепловых условий почво-грунтов и растительности Большеземельской тундры в естественном и нарушенном состоянии // Геология разведки. 1980. № 7. С. 134.
- Какунов Н.Б., Павлов А.В.* Оценка и прогноз термического режима криогенных почв на Север России в связи с ожидаемым потеплением климата / Криопедология 97. Тез. докл. II междунар. конф. 5–8 августа 1997 г. Сыктывкар, 1997. С. 12.
- Климатологический справочник по СССР. Вып. I. Европейская часть СССР. Л.: Главная геофизическая обсерватория, 1932. 118 с.
- Кравцова В.И., Быстрова А.Г.* Изучение динамики термокарстовых озер России // Геоинформатика. № 1. 2009. С. 44–51.
- Мельников В.П., Павлов А.В., Малкова Г.В.* Геокриологические последствия современных изменений глобального климата // География и природные ресурсы. 2007. № 3. С. 19–27.
- Павлов А.В.* Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 3. С. 22–27.
- Природная среда в условиях открытой разработки угля (на примере Юньягинского месторождения) / Под ред. Гецен М.В. Сыктывкар, 2005. 246 с.
- Шур Ю.Л.* Термокарст (к теплофизическим основам учения о закономерностях развития процесса). М.: Недра, 1977. 80 с.
- Burn C.R.* Tundra lakes and permafrost, Richards Island, western Arctic coast, Canada // Can. J. Earth Sci. 2002. V. 39. P. 1281–1298.
- Fitzgerald D., Riordan B.A.* Permafrost and ponds. Remote sensing and GIS used to monitor Alaska wetlands at the landscape level // Agroborealis. 2003. V. 35. № 1. P. 30–35.
- Frohn R.C., Hinkel K.M., Eisner W.R.* Satellite remote sensing classification of thaw lakes and drained thaw lake basins on the North Slope of Alaska // Rem. Sens. Environ. 2005. V. 97. № 1. P. 116–126.
- Heikkinen J.E.P., Virtanen T., Huttunen J., Elsakov V., Martikainen P.* Carbon balance in East European tundra // Global Biogeochem. Cycles. 2004. V. 18. № GB1023. doi: 10.1029/2003GB002054. P. 1–13.
- Huang Ch.* Derivation of a Tasseled Cap transformation based on Landsat 7 satellite reflectance / Eds. Huang Ch., Wylie B., Yang L., Homer C., Zylstra G. Raytheon ITSS, USGS EROS Data Center Sioux Falls, USA. 2001. 10 p.
- Kennedy R.E., Cohen W.B.* Automated designation of tie-points for image-to-image coregistration // Int. J. Rem. Sens. 2003. V. 24. P. 3467–3490.
- King R.* Tasseled Cap transformation Mississippi coastal corridor July 24, 2000 / Eds. King R., O’Hara Ch., Wang L. CGTS, Mississippi State University, 2001.
- Luoto M., Seppälä M.* Thermokarst ponds as indicators of the former distribution of Palsas in Finnish Lapland // Permafrost Periglac. Process. V. 14. 2003. P. 19–27.
- Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D.* Disappearing arctic lakes // Science. 2005. № 308. P. 142.
- Vallée Sh., Payette S.* Collapse of permafrost mounds along a subarctic river over the last 100 years (northern Québec) // Geomorph. 2007. V. 90. P. 162–170.
- Zwoliczki Z., Rachlewicz G., Mazurek M., Paluszkiwicz R.* The geoecological model for small tundra lakes, Spitsbergen // Landform Analysis. 2007. V. 5. P. 113–118.

The Inter-Year Changes of Thermokarst Lakes on North-East Part of European Russia

V. V. Elsakov, I. O. Maruschak

Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar

The main trends of thermokarst lakes dynamic were studied in latitudinal gradient of permafrost soils zones on East-Europe Russia with Landsat satellite data per period of 1973–2009. The maximum observed changes for lakes were related with drainage of lakes at the area of discontinue permafrost zone. Near 80% of changes at this zone were fixed for period 1973–1988. The area of continues permafrost zone was most stable for changes until 1988. The main changes of lakes were observed for this zone in period of 1988–2002. The changes intensity was increased in direction to the south border of discontinues cryolitozone and for all permafrost area after 2002. These changes can be associated with climatic warming noted after 1970-ths.

Keywords: thermokarst lakes dynamic, satellite monitoring, climatic changes