НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 1, с. 81–89 http://www.izdatgeo.ru

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КРИОСФЕРЫ

УДК 528.8:551.343(470)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛОЩАДИ И КОЛИЧЕСТВА ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР В РАЗЛИЧНЫХ РАЙОНАХ КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИИ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

В.И. Кравцова, Т.В. Родионова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, 199991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; valentinamsu@yandex.ru

Разработан метод достоверного определения изменений площади термокарстовых озер, основанный на сравнении разновременных снимков Landsat, полученных за период потепления с 1970-х гг., учитывающий различное разрешение снимков MSS (Multispectral Scanner) и TM (Thematic Mapper). Исследовано 39 тестовых участков, охватывающих около 300 000 озер в шести районах криолитозоны России (Север Европейской России, Западная Сибирь, Восточная Сибирь, Дальний Восток, Центральная Якутия, Забайкалье). Выявлена небольшая разнонаправленная динамика за 1970–2000 гг.: площади одних озер уменьшились на 2.9 %, а других увеличились на 1.2 %. Массовое сокращение площадей озер объясняется их спуском эрозионной сетью. Увеличение площадей озер связано с их наполнением водотоками (повсеместно), циклическими изменениями осадков (Центральная Якутия), антропогенным воздействием (Западная Сибирь), некоторой активизацией термокарста в районах высокольдистых пород (полуостров Ямал, Яно-Индигирская низменность). Сделано заключение, что динамика площади и количества термокарстовых озер определяется сложным комплексом факторов и не может быть использована как индикатор влияния потепления климата на криолитозону.

Термокарстовые озера, динамика, криолитозона, потепление климата, космические снимки

INVESTIGATION OF THE DYNAMICS IN AREA AND NUMBER OF THERMOKARST LAKES IN VARIOUS REGIONS OF RUSSIAN CRYOLITHOZONE, USING SATELLITE IMAGES

V.I. Kravtsova , T.V. Rodionova

Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, 199991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; valentinamsu@yandex.ru

We have developed a reliable method to determine changes in the area of thermokarst lakes, which is based on comparison of multitemporal imagery from Landsat satellites. These were acquired during the warming period since the 1970s. The method takes into account the difference in spatial resolution for MSS (Multispectral Scanner) and TM (Thematic Mapper) scanning systems. We have investigated 39 test sites which cover nearly 300,000 lakes in six regions of the Russian cryolithozone: the North of European Russia, Western Siberia, Eastern Siberia and Far East, Central Yakutia, Transbaikal hollows. As a result, we have identified very small and contradictory changes in 1970–2000: areas of some lakes reduced by 2.9 % and areas of others enlarged by 1.2 %. Mass reduction in lake areas occurs when they are drained by rivers. Increase in lake areas is widespread due to influx of water with rivers, cyclical changes in precipitation (Central Yakutia), anthropogenic pressure (West Siberia), and activation of thermokarst in highly icy permafrost (Yamal, Yana-Indigirka lowland). We conclude that the dynamics of the area and number of thermokarst lakes is controlled by a complex set of factors and so they cannot be used as indicators of climate warming impact on cryolithozone.

Thermokarst lakes, dynamics, cryolithozone, climate warming, satellite images

ВВЕДЕНИЕ

Динамика термокарстовых озер привлекает внимание ученых и практиков как возможный показатель состояния криолитозоны при потеплении климата. В связи с этим начиная с 2000-х гг. выполнены многочисленные исследования изменений количества и площади термокарстовых озер, охватывающие области как сплошного, так и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород в пределах криолитозоны Евразии и п-ова Аляска.

© В.И. Кравцова, Т.В. Родионова, 2016

В ряде исследований выявлены существенные и разнонаправленные изменения термокарстовых озер с 1950-х–1970-х гг., которые авторы связывали с активизацией термокарстового процесса из-за потепления климата: сокращение количества и площади озер на Аляске, где в зоне прерывистой мерзлоты наблюдается уменьшение площади озер до 50 % [*Fitzgerald, Riordan, 2003; Riordan et al., 2006*], увеличение этих показателей до 12 % в зоне сплошной мерзлоты в Западной Сибири [*Кирпотин и др., 2008; Брыксина и др., 2009; Smith et al., 2005*], двукратное увеличение площади озер в Центральной Якутии [*Кравцова, Быстрова, 2009*]. При этом по одним и тем же территориям, в частности по Западной Сибири, результаты имели существенные расхождения [*Кирпотин и др., 2008; Кравцова, Тарасенко, 2010*], что могло быть связано с различными методическими подходами.

Это обусловило необходимость разработки методики аэрокосмических исследований динамики термокарстовых озер, обеспечивающей достоверные результаты, и выполнения исследований на основе единой методики в различных районах криолитозоны с учетом их географической специфики, факторов, влияющих на процессы термокарста. В итоге должны быть определены возможности использования динамики термокарстовых озер в качестве индикатора состояния криолитозоны при потеплении климата.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

В качестве основных материалов при изучении динамики термокарстовых озер используются космические снимки со спутника Landsat, имеющие ряд преимуществ по сравнению с другими космическими снимками. Прежде всего съемка в течение длительного периода (с 1970-х гг.) выполнена идентичными съемочными системами, что в значительной мере обеспечивает сопоставимость снимков. Однако эти снимки имеют существенные недостатки в связи с невысоким пространственным разрешением, причем неодинаковым (80 м у съемочной системы MSS (Multispectral Scanner) и 30 м у TM (Thematic Mapper), ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)) для разных периодов съемки.

Оценка надежности дешифрирования термокарстовых озер по космическим снимкам со спутника Landsat, выполненная с использованием снимков сверхвысокого разрешения со спутников WorldView-1, IRS-P5 (Cartosat) и SPOT-5 с разрешением 0.5–2.5 м, показала, что на снимке ETM+(TM)/Landsat полнота дешифрирования более 90 % обеспечивается лишь для озер площадью более 0.5 га, а на снимке MSS/Landsat – для озер площадью более 3 га, что необходимо учитывать при подсчете количества озер. Определение значений площади озер с погрешностью менее 10 % возможно на снимке ETM+(TM)/Landsat лишь для крупных озер площадью более 10 га, а на снимке MSS/Landsat – для озер площадью более 40 га. В связи с этим при использовании космических снимков со спутника Landsat необходимо исключать из рассмотрения малые озера с полнотой дешифрирования менее 90 % и учитывать погрешности определения площади озер.

Таким образом, сравнение разновременных снимков со спутника Landsat разного разрешения требует приведения их к одинаковой детальности путем исключения озер, не отображающихся на менее детальном снимке [*Тарасенко, 2013*]. При сравнении разновременных снимков одинакового разрешения необходимо исключить из анализа малые озера, по-разному изображающиеся на этих снимках из-за различий в их положении относительно сетки пикселов. Пороговые значения, обеспечивающие правомерность такого сравнения, определенные в результате сопоставления одновременных космических снимков со спутника Landsat, составили: 0.4 га для снимков ETM+ (TM)/Landsat и 2 га для снимков MSS/Landsat. Исключение из анализа малых озер такой величины обеспечивает сопоставимость количества озер на сравниваемых снимках [*Родионова, 2014*].

Из-за больших погрешностей определения площади малых озер, по количеству преобладающих в большинстве районов, нецелесообразно определять изменение суммарной площади всех озер. Следует оценивать изменения площади отдельных озер с учетом среднеквадратической погрешности σ их определения (изменения площади, превышающие значение 1.64σ).

Количественную оценку изменений площади озер необходимо сочетать с составлением картографических материалов – схем динамики термокарстовых озер, визуально отображающих выявленные изменения и обеспечивающих их пространственный анализ.

ВЫБОР РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выяснения особенностей изменения площади термокарстовых озер в различных геокриологических и ландшафтных условиях необходимо было обеспечить широкий охват районов исследования.

Выбор районов определялся, во-первых, распространением термокарстовых озер на территории России. Предварительно была составлена карта распространения термокарстовых озер на территории России, основанная на анализе космических снимков, представленных в виде “снимкового” покрытия в системе GoogleEarth (рис. 1) [*Кравцова, 2009*]. Авторы исходили из того, что в криолитозоне, особенно в районах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород, расположены озера преимущественно термокарс-

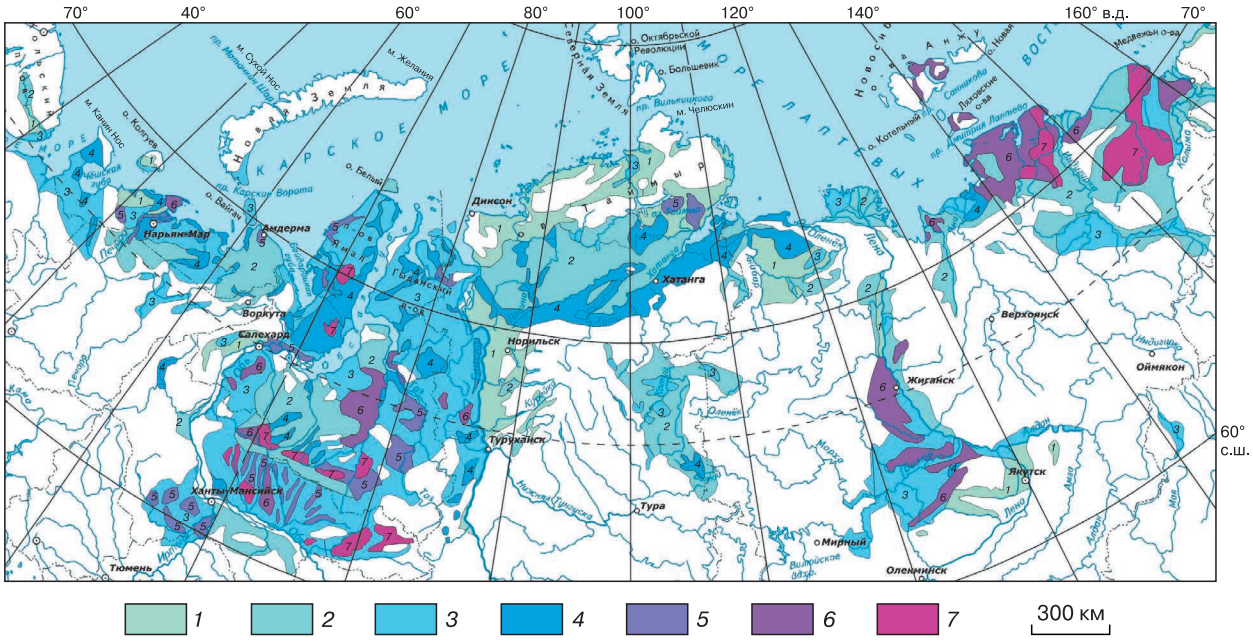

Рис. 1. Распространение термокарстовых озер на территории России.

Преобладающие размеры озер: *1* – малые; *2* – средние. Сочетания озер разных размеров: *3* – малые и средние; *4* – малые и большие; *5* – малые и крупные; *6* – средние и большие; *7* – средние и крупные. Диаметр озер (км): малых – 0.1–0.5, средних – 0.5–1.5, больших – 1.5–3.0, крупных – 3–6.

тового происхождения или озера, испытывавшие в прошлом воздействие процесса термокарста. Поэтому в выбранных районах рассматривались все озера, без разделения их по генезису.

Поскольку развитие термокарста предполагает наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород и равнинный характер территории, ареной массового развития термокарста являются северные приморские низменности, представляющие собой аккумулятивные поверхности. Наиболее широко термокарстовые озера распространены в пределах Западно-Сибирской низменности и на севере Восточной Сибири на территории Яно-Индигирской и Колымской низменностей (причем в этих двух районах это достаточно крупные озера, образующие густую сеть). Термокарстовые озера достаточно широко распространены также на Севере европейской части России, в Центральной Якутии и на севере Дальнего Востока (Анадырская низменность). Локальный характер распространения имеют термокарстовые озера по долинам рек в разных районах криолитозоны России, в том числе в котловинах Забайкалья.

Во-вторых, выбор районов исследования зависел от распределения наблюдаемого в настоящее время потепления климата. Массовое возникновение термокарста связывается с оттаиванием плейстоценовых отложений в эпоху голоценового климатического оптимума. Возможную современную активизацию термокарста связывают также с увеличением глубин сезонного или многолетнего протаивания до глубин залегания мерзлых пород. Однако вопрос о вероятном влиянии современного потепления климата на активизацию термокарста остается открытым, несмотря на ряд утверждающих это исследований [*Брыксина и др., 2009; Smith et al., 2005*]. При выборе районов авторы опирались на составленные Г.В. Малковой и А.В. Павловым карты трендов увеличения среднегодовой температуры воздуха и температуры мерзлых толщ и карту метеогеокриологического риска криолотозоны России, согласно которым наиболее высокие значения трендов температуры воздуха отмечаются на юге Западной Сибири, в Центральной Якутии и на Анадырской низменности, наиболее низкие – на севере Средней и Восточной Сибири, на Югорском п-ове, в области высокого метеогеокриологического риска попадают север Западной Сибири, Север европейской части России и Чукотка, а в области слабого метеогеокриологического риска – дельта р. Лены, Северная Якутия и частично Южная Якутия [*Малкова, Павлов, 2012*].

Помимо этого при выборе районов были учтены результаты уже имеющихся исследований динамики озер, в которых обнаружено неодинаковое протекание процесса в разных регионах, а в некоторых получены различные результаты для одно-

го и того же района. Прежде всего это относится к Западной Сибири, где одни исследователи указывают на увеличение площади озер в зоне сплошного распространения мерзлоты [*Кирпотин и др., 2008; Брыксина и др., 2009; Smith et al., 2005*], а другие – на уменьшение площади озер [*Кравцова, Быстрова, 2009; Кравцова, Тарасенко, 2010*].

В результате с учетом указанных критериев на территории распространения криолитозоны России были выбраны следующие районы: Север Европейской России; Западная Сибирь; север Восточной Сибири; север Дальнего Востока; Центральная Якутия; котловины Забайкалья (рис. 2).

В каждом из шести выделенных районов проводили исследования на эталонных участках. Было изучено 39 эталонных участков размером около 20 × 30 км и охвачено анализом 300 тыс. озер.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В пределах каждого эталонного участка по паре разновременных космических снимков со спутника Landsat были проанализированы многолетние изменения площади озер.

В качестве снимков за первую дату в зависимости от наличия материалов были использованы космические снимки, полученные съемочной системой MSS с пространственным разрешением 80 м, которая начала работать с 1972 г., и космические снимки, полученные системой TM с пространственным разрешением 30 м (с 1982 г.), а в качестве снимков за вторую дату – современные снимки, полученные съемочными системами TM и ETM+ с пространственным разрешением 30 м.

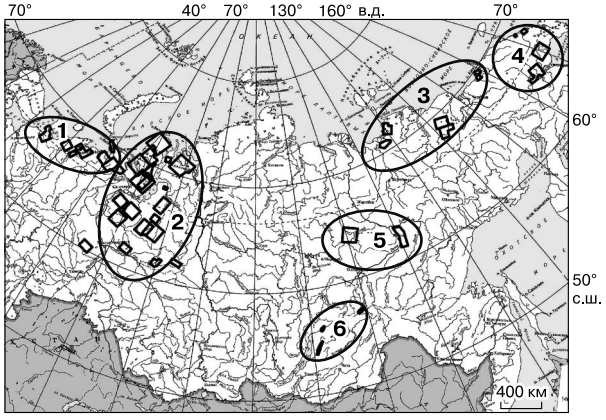

Рис. 2. Районы исследований динамики термокарстовых озер.

1 – Север Европейской России, **2** – Западная Сибирь, **3** – север Восточной Сибири, **4** – север Дальнего Востока, **5** – Центральная Якутия, **6** – котловины Забайкалья. Прямоугольниками показаны контуры эталонных участков.

Использование космических снимков со спутника Landsat при изучении динамики термокарстовых озер, как указывалось, имеет свои ограничения, накладываемые их пространственным разрешением, и влечет за собой исключение из анализа большого количества малых озер, не отобразившихся на снимках MSS, путем введения пороговых значений для снимков TM. Пороговое значение при сравнении снимков разного пространственного разрешения (снимков MSS и TM) составляет 2 га, при сравнении снимков одинакового разрешения (снимков TM за разные даты) – 0.4 га.

В пределах каждого эталонного участка рассчитаны количество и общая площадь анализируемых озер. После введения порогового значения из исследования исключается большое количество озер малого размера. Несмотря на это, общая площадь рассмотренных озер изменяется несущественно, так как основную часть этой величины составляет суммарная площадь крупных озер.

Анализ многолетних изменений по совмещенным разновременным изображениям, полученным после выполнения дешифрирования озер и введения пороговых значений, был основан на определении изменений (приращения или сокращения) площади каждого конкретного озера, отборе озер с величиной изменения, превышающей среднеквадратическую погрешность определения площади озер, визуальном контроле и анализе наблюдаемых изменений. При контроле из числа изменившихся озер исключались те, чьи изменения визуально не фиксировались на сравниваемых космических снимках, а были обусловлены, скорее всего, погрешностью определения площади озер. Кроме того, на характерные фрагменты эталонных участков были составлены схемы динамики озер, позволяющие визуально зафиксировать эти изменения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате для каждого эталонного участка было определено количество озер, площадь которых уменьшилась, количество озер, площадь которых увеличилась, и изменение площади озер в квадратных километрах. Эти результаты отражены на картах. Пример такой карты для территории Западной Сибири, где исследовано 20 эталонных участков, представлен на рис. 3. На фрагменты всех эталонных участков получены детальные (1:100 000) картографические материалы: составлены схемы динамики озер, отражающие наиболее характерные для района изменения и обеспечивающие визуальный пространственный географический анализ. Фрагменты таких схем динамики площади озер приведены на рис. 4. На территорию криолитозоны России в целом для шести рассмотренных районов составлено 56 схем динамики

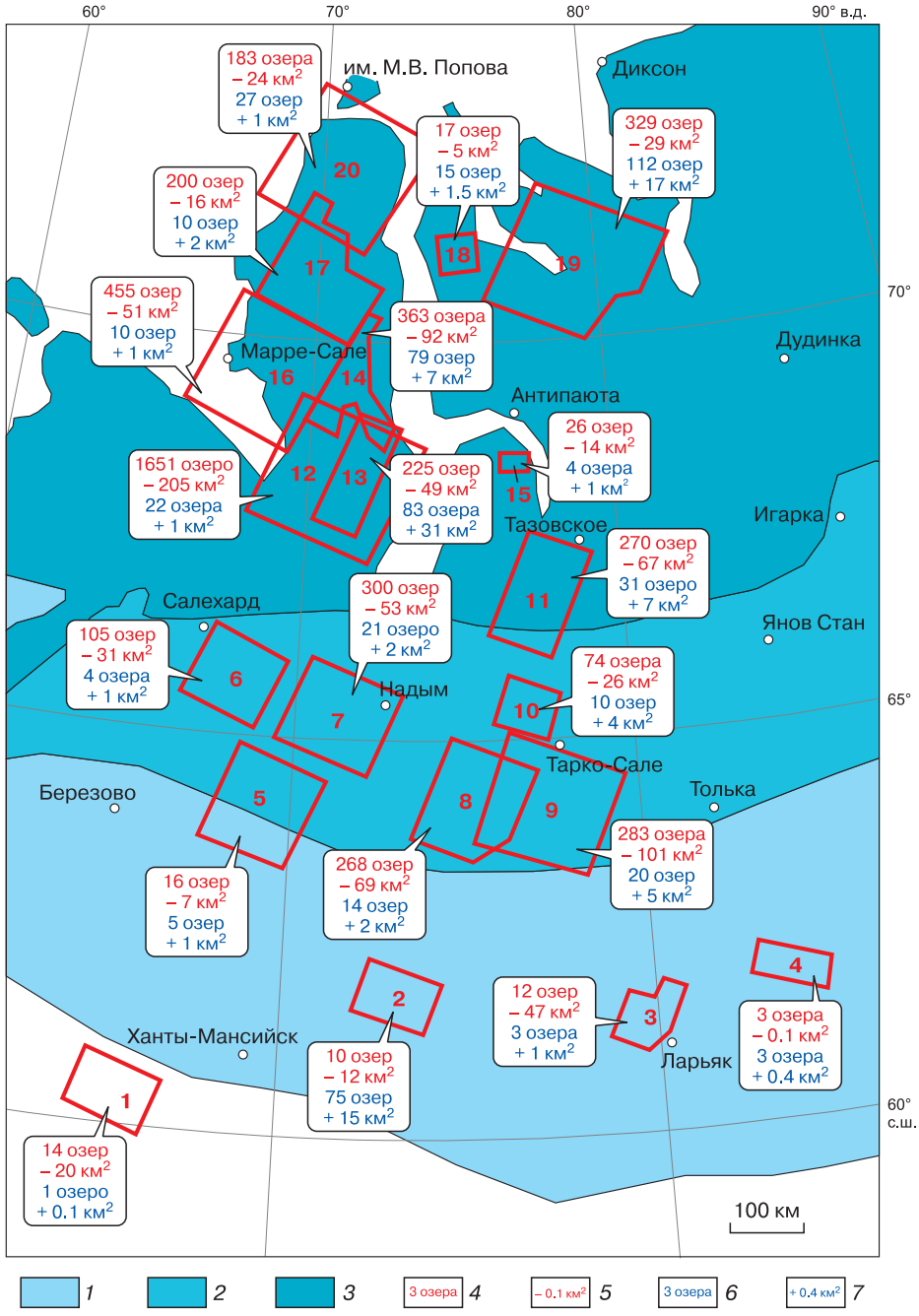

Рис. 3. Справочная карта, отражающая результаты определения изменений площади озер по эталонным участкам 1–20 (Западная Сибирь).

Распространение многолетнемерзлых пород: *1* – островное, *2* – прерывистое, *3* – сплошное. *4* – количество уменьшившихся озер, *5* – изменение их площади; *6* – количество увеличившихся озер, *7* – изменение их площади.

площади термокарстовых озер. Выполнение схем на “снимковой” подложке обеспечивает выявление причин изменения, для анализа которых привлекались также гидрологические, метеорологические, геоботанические, тектонические, геокриологические и другие тематические материалы.

Для удобства сравнения результатов, полученных по эталонным участкам, все показатели (количество изменившихся озер и изменение площади озер) были рассчитаны в отношении к площади эталонных участков и приведены в виде графиков для шести исследованных районов (рис. 5, 6).

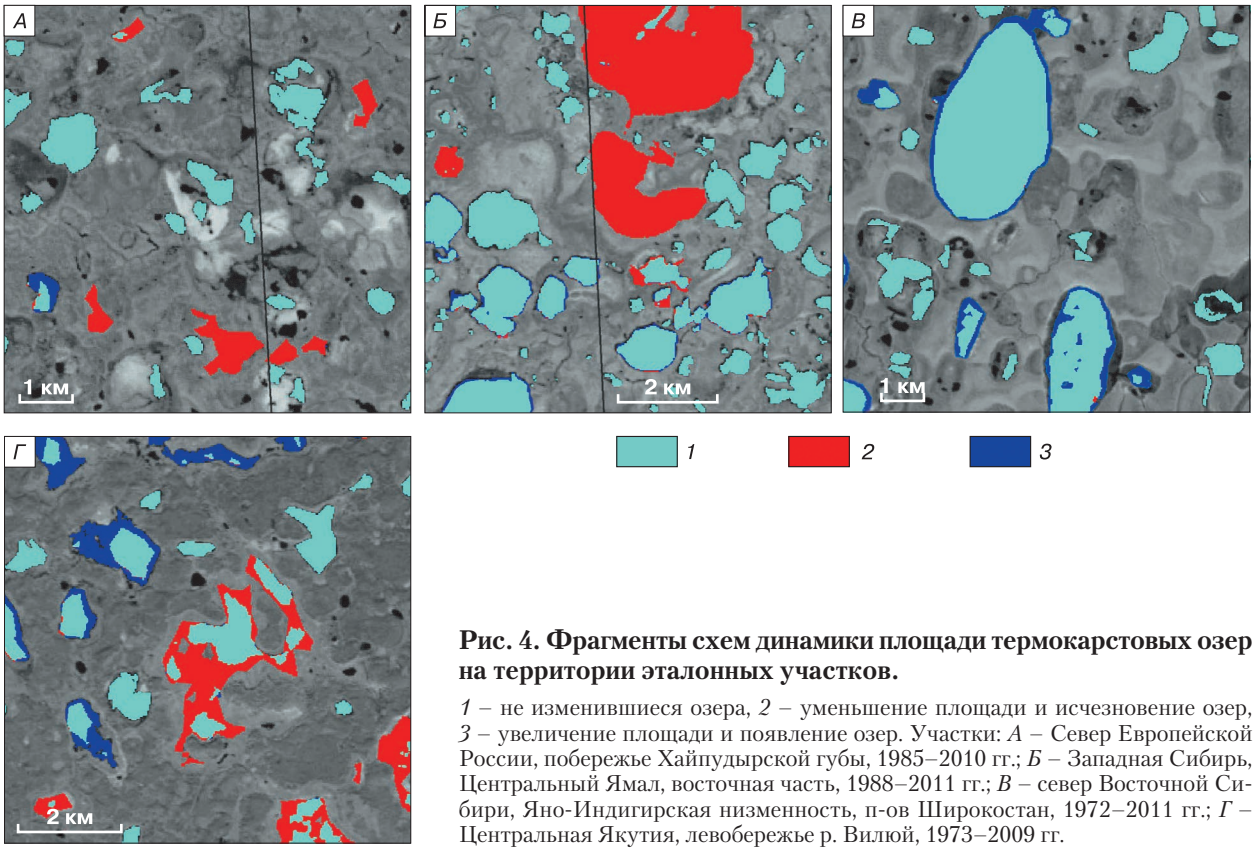

Рис. 4. Фрагменты схем динамики площади термокарстовых озер на территории эталонных участков.

1 – не изменившиеся озера, *2* – уменьшение площади и исчезновение озер, *3* – увеличение площади и появление озер. Участки: *А* – Север Европейской России, побережье Хайпудырской губы, 1985–2010 гг.; *Б* – Западная Сибирь, Центральный Ямал, восточная часть, 1988–2011 гг.; *В* – север Восточной Сибири, Яно-Индигирская низменность, п-ов Широкостан, 1972–2011 гг.; *Г* – Центральная Якутия, левобережье р. Вилюй, 1973–2009 гг.

На рис. 5, 6 видны разнонаправленные изменения площади озер в различных районах криолитозоны России. Во всех районах встречаются озера, площадь которых уменьшилась, и озера, площадь которых увеличилась. Однако в целом по территории России с 1970-х–1980-х по 2000-е гг. сокращение площади и количества термокарстовых озер преобладает над их увеличением. Сокращение площади озер в среднем для всех проанализированных в шести районах 39 эталонных участков составляет –2.9 %, а увеличение +1.2 %. Уменьшение количества озер составляет –0.5 %, а увеличение +0.3 % (табл. 1, 2).

Наибольшее сокращение площади озер отмечается на территории Западной Сибири, на севере Восточной Сибири в пределах Колымской низ-

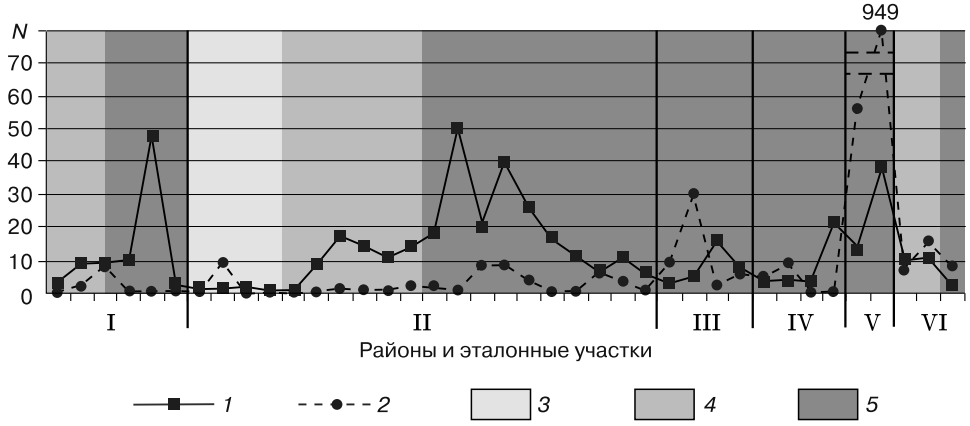

Рис. 5. Количество изменившихся озер на 1000 км^2 (*N*) в пределах эталонных участков:

1 – количество уменьшившихся озер, *2* – количество увеличившихся озер (каждая точка графика отражает результаты по эталонному участку). Распространение многолетнемерзлых пород: *3* – островное, *4* – прерывистое, *5* – сплошное. Районы исследования: I – Север Европейской России, II – Западная Сибирь, III – север Восточной Сибири, IV – север Дальнего Востока, V – Центральная Якутия, VI – котловины Забайкалья.

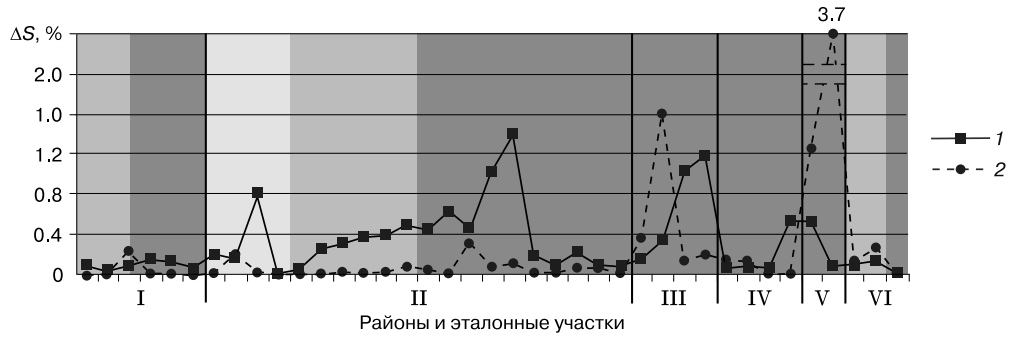

Рис. 6. Изменение площади озер (Δ*S*) относительно площади эталонных участков:

1 – уменьшение площади озер, *2* – увеличение площади озер (каждая точка графика отражает результаты по эталонному участку). Остальные обозн. см. рис. 5.

Таблица 1. **Изменение площади термокарстовых озер в различных районах криолитозоны с 1970-х по 2000-е годы**

Район исследования	*S*, км^2	Δ*S*, км^2	
		уменьшение	увеличение
Север европейской части России	3536	69.3 (–1.9)	29.1 (+0.8)
Западная Сибирь	27 623	918.1 (–3.2)	101.0 (+0.3)
Север Восточной Сибири и Дальнего Востока	18 779	416 (–2.2)	173.5 (+0.9)
Центральная Якутия	1209	120.6 (–11.8)	309.0 (+30)
Котловины Забайкалья	147	4.3 (–3.0)	6.5 (+4.5)
Россия в целом	51 294	1528 (–2.9)	619 (+1.2)

Примечание. *S* – суммарная площадь проанализированных озер по состоянию на первую дату; Δ*S* – изменение площади термокарстовых озер. В скобках указано изменение величины в процентах от площади озер на первую дату.

Таблица 2. **Изменение количества термокарстовых озер в различных районах криолитозоны с 1970-х по 2000-е годы**

Район исследования	*N*	Δ*N*	
		уменьшение	увеличение
Север европейской части России	42 173	341 (–0.8)	20 (+0.05)
Западная Сибирь	230 162	870 (–0.4)	114 (+0.05)
Север Восточной Сибири и Дальнего Востока	22 789	173 (–0.8)	44 (+0.2)
Центральная Якутия	5058	60 (–1.2)	768 (+15)
Котловины Забайкалья	1345	12 (–0.9)	31 (+2.3)
Россия в целом	303 500	1456 (–0.5)	977 (+0.3)

Примечание. *N* – суммарное количество проанализированных озер по состоянию на первую дату; Δ*N* – изменение количества термокарстовых озер. В скобках указано изменение величины в процентах от количества озер на первую дату.

менности и на севере Дальнего Востока в Анадырской низменности (см. рис. 6). Массовое сокращение площади озер на территории России обусловлено главным образом деятельностью водотоков, по которым осуществляется спуск озер, и зарастанием водоемов растительностью. Прямого влияния потепления климата на эти процессы не выявлено, можно говорить лишь о вероятном его косвенном влиянии на активизацию эрозионных и термоэрозионных процессов.

Увеличение площади озер, как по количеству увеличившихся озер, так и по приращению площади, в целом существенно меньше сокращения и значимо преобладает над уменьшением лишь на территории Центральной Якутии, а также на севере Восточной Сибири в пределах Яно-Индигирской низменности, и незначительно – на отдельных участках в зоне островного распространения мерзлоты на территории Западной Сибири и в котловинах Забайкалья (см. рис. 5, 6). Локальное

увеличение площади озер, однако меньшее чем их уменьшение, отмечается также в зоне сплошного распространения мерзлоты на территории Западной Сибири – на полуостровах Ямал и Гыданский. Наблюдаемое в разных регионах увеличение площади озер объясняется целым рядом факторов и далеко не всегда связано с повышением температуры воздуха.

Во многих исследованных районах (на севере Европейской России в дельте р. Печора, на территории Яно-Индигирской низменности в дельте р. Яна, на территории Колымской низменности в долине р. Алазея, а также в котловинах Забайкалья) отмеченное увеличение площади озер обусловлено гидрологическими причинами: деятельностью соединяющих озера водотоков, по которым происходит наполнение озерных котловин. Увеличение площади озер в этих регионах, как правило, связано с изменчивостью водного режима и водного баланса рек и водотоков.

На территории Центральной Якутии, где отмечено наибольшее увеличение площади озер, оно тесно связано с колебаниями количества осадков, имеющими цикличный характер с чередованием многоводных и маловодных периодов. Вслед за цикличностью много- и маловодных периодов выявлены соответствующие цикличные межгодовые изменения (увеличение и уменьшение) площади озер.

На территории Яно-Индигирской и частично Колымской низменностей, а также на севере Западной Сибири (в отдельных районах п-овов Ямал и Гыданский) отмечается увеличение площади озер в виде узкой каймы по краю озерной котловины. Такое увеличение площади озер в районах сплошного распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород может быть обусловлено развитием процессов термокарста и термоабразии в результате волновой деятельности. Это единственный вид изменений, для которых можно предположить активизацию термокарстовых процессов с некоторым увеличением площади озер.

В районах разработки нефтегазовых месторождений (на юге Западной Сибири) отмечается влияние антропогенной деятельности на увеличение площади озер. Это проявляется в искусственном изменении гидрографической сети (при изъятии грунта, возведении насыпных площадок), изменении уровня грунтовых вод при закачке технологических растворов, непосредственном тепловом воздействии технических сооружений.

Таким образом, на территории криолитозоны нашей страны преобладает сокращение площади термокарстовых озер, обусловленное преимущественно эрозионной деятельностью рек и зарастанием водоемов. Увеличение площади озер, значимое лишь в ряде районов и локально встречающееся практически во всех рассмотренных районах, обусловлено рядом факторов: деятельностью водотоков, количеством атмосферных осадков, возможной активизацией процессов термокарста в районах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород, влиянием техногенных процессов.

Детальное исследование динамики термокарстовых озер на севере Яно-Индигирской низменности показало также роль неотектоники в развитии термокарста, проявляющуюся через влияние на водный режим территории. Тектоническое поднятие способствует дренированности территории и не вызывает образования новых озер, а опускание, наоборот, сопровождается обводнением поверхности и увеличением размеров и густоты сети озер. Наибольшее увеличение площади озер в виде узкой каймы по краю озерной котловины в этом районе отмечается именно в областях тектонических опусканий.

Что же касается наших расхождений с результатами западносибирских и американских исследователей [*Брыксина и др., 2009; Smith et al., 2005*], описывающих увеличение площади термокарстовых озер в зоне сплошного распространения мерзлоты в Западной Сибири и связывающих их с потеплением климата, то некоторое увеличение площади термокарстовых озер в этих районах выявлено и нами. Однако, по нашим данным, процесс сокращения водоемов здесь протекает значительно интенсивнее (количество озер уменьшенной площади в 4.5 раза больше, чем с увеличенной; величина уменьшения площади озер в 3.5 раза больше, чем ее увеличения). Таким образом, о преобладающем увеличении площади термокарстовых озер в этом районе под влиянием современного потепления климата не может быть и речи.

В сложном комплексе факторов, влияющих на изменение размеров озер, выделить влияние современного потепления климата не представляется возможным. Динамику термокарстовых озер нельзя рассматривать как результат влияния одного фактора – потепления климата, она определяется комплексом факторов: гидрологических, метеорологических, тектонических, антропогенных.

ВЫВОДЫ

1. Термокарстовые озера, распространенные на территории криолитозоны России, характеризуются изменчивостью, выраженной как в уменьшении, так и в увеличении их площади и количества.

2. За период с 1970-х–1980-х по 2000-е гг. в целом по территории криолитозоны России сокращение площади озер и их количества преобладает над их увеличением. Сокращение площади озер в среднем для проанализированных в шести районах 39 эталонных участков составляет –2.9 %, а увеличение +1.2 %. Уменьшение количества озер составляет –0.5 %, а увеличение +0.3 %. В различных районах криолитозоны эта картина неодинаковая.

3. Изменчивость термокарстовых озер определяется целым рядом сложно взаимодействующих факторов. Помимо повышения температуры воздуха, которое могло бы вызывать протаивание мерзлых пород и активизацию термокарстового процесса, действуют следующие факторы.

Гидрологические – деятельность соединяющих озера водотоков, по которым осуществляется спуск озер или наполнение озерных котловин, эрозионная деятельность рек вблизи озерных котловин, вызывающая прорывы озер или их наполнение. Гидрологические факторы вызывают как уменьшение, так и увеличение площади озер. В результате их деятельности могут наблюдаться циклические изменения площади озер от года к году.

Метеорологические – колебания количества атмосферных осадков, имеющие в отдельных районах цикличный характер с чередованием многоводных и маловодных периодов. В таких случаях фиксируются преимущественно однонаправленные изменения площади озер в пределах целого района, которые могут менять свой характер от года к году в зависимости от продолжительности много- и маловодных периодов.

Антропогенная деятельность, особенно в районах разработки нефтегазовых месторождений и строительства нефтегазопроводов, проявляющаяся в искусственном изменении гидрологической сети и непосредственном тепловом воздействии технических сооружений. Эта деятельность может вызывать как увеличение, так и сокращение площади озер, однако в большинстве случаев отмечается увеличение их площади.

Помимо указанных факторов выявлена также роль *неотектоники* в развитии термокарста, проявляющаяся в однонаправленных медленных движениях земной коры и оказывающая влияние на водный режим территории. Тектонические поднятия способствуют дренированности территории и спуску озер, а тектонические опускания, наоборот, сопровождаются обводнением территории и увеличением размеров озер.

4. Наблюдаемое на территории криолитозоны массовое сокращение площади озер обусловлено главным образом гидрологическими факторами и зарастанием водоемов растительностью. В отдельных случаях отмечается влияние антропогенной деятельности.

Увеличение площади озер на территории криолитозоны России обусловлено целым рядом факторов: возможной активизацией термокарстового процесса в районах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород, сопровождающейся незначительным увеличением площади озер по краю озерной котловины (на Яно-Индигирской низменности, на побережье Северного Ледовитого океана, на п-овах Ямал и Гыданский); гидрологическими факторами, действующими повсеместно, но особенно сильно проявляющимися в речных долинах на территории Колымской низменности, в дельтах рек Печора и Яна, в котловинах Забайкалья; цикличным изменением количества атмосферных осадков, в частности на территории Центральной Якутии, которое приводит как к увеличению площади озер, так и к их уменьшению в зависимости от наступления многоводного или маловодного периода; антропогенной деятельностью, особенно в районах активной нефтедобычи на территории Среднеобской низменности на юге Западной Сибири.

5. В сложном комплексе факторов, оказывающих воздействие на изменение размеров озер, выделить влияние современного потепления климата практически не возможно.

Литература

Брыксина Н.А., Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Изучение взаимосвязи изменений климатических и термокарстовых процессов в зонах сплошной и прерывистой мерзлоты Западной Сибири // Вестн. Югор. ун-та, 2009, № 3, с. 3–12.

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. ун-та, 2008, июнь, № 311, с. 185–189.

Кравцова В.И. Распространение термокарстовых озер в России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2009, № 3, с. 33–42.

Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 2, с. 16–26.

Кравцова В.И., Тарасенко Т.В. Изучение и картографирование динамики термокарстовых озер на территории Западной Сибири по разновременным космическим снимкам // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата, 2010, № 1, с. 82–87.

Малкова Г.В., Павлов А.В. Геоинформационное картографирование современных изменений климата и криолитозоны на севере России // Тр. Десятой междунар. конф. по мерзлотоведению TICOP (Салехард, 25–29 июня 2012 г.). Тюмень, Печатник, 2012, т. 3, с. 313–318.

Родионова Т.В. Исследование динамики термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2014, 26 с.

Тарасенко Т.В. Оценка возможностей использования снимков со спутника Landsat для изучения динамики термокарстовых озер [Электронный ресурс] // Тез. конф. “Геокриологическое картографирование: проблемы и перспективы” (Москва, 5–6 июня 2013 г.). 2013. Режим доступа: CD-R. Номер гос. регистрации обязат. электрон. издания – 0321302405.

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.

Riordan B., Verbyla D., David McGuire A. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // J. Geophys. Res., 2006, vol. 111, G04002, doi: 10.1029/2005JG000150.

Smith L.C., Sheng Y., Macdonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic lakes // Science, 2005, vol. 308, No. 5727, p. 1429.

Поступила в редакцию
2 марта 2015 г.