

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ АКТИВИЗАЦИИ ОЗЕРНОГО ТЕРМОКАРСТА ЗА ПЕРИОД 1966-2021 гг. (НА ПРИМЕРЕ ЗАБОЛОЧЕННОГО УЧАСТКА ЯНО-ИНДИГИРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ)

© 2025 г. Т. В. Орлов¹*, В. В. Бондарь¹, М. В. Архипова¹

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: tim.orlov@gmail.com

Поступила в редакцию 25.09.2024 г.

Активизация термокарстовых процессов под воздействием потепления климата за последние десятилетия в криолитозоне наблюдается практически повсеместно, изучению этих процессов посвящено множество исследований, особое внимание среди них уделяется количественным закономерностям термокарстовых озер и их динамики. Целью исследования являлся анализ динамики термокарстовых озер и оценка их количественных характеристик по материалам космической съемки, а также связи динамики термокарстовых озер с климатическими изменениями. Исследование проводилось на примере участка Яно-Индигирской низменности на севере Якутии на основе серии космических снимков Corona, Landsat-7 и Sentinel-2 за 6 периодов наблюдения: 1966, 1976, 1999, 2007, 2013 и 2021 года, а также цифровой модели рельефа ArcticDEM (2 м/пикс). На участке выделено 248 озер и 303 аласа, озера были классифицированы на 6 основных классов по их типу и расположению. Исследование показало общий рост площадей и количества озер, при этом динамика озер имеет разнонаправленный характер. Остаточные озера внутри аласов имеют постоянную тенденцию к сокращению площади, тогда как термокарстовые озера внутри аласов росли в 1976 и 2007, в остальные года общая площадь сокращалась. В 1999 и 2013 годах площади озер увеличились на 3.1% и 20% соответственно, в остальные года наблюдается небольшое уменьшение площадей. Количество озер в общей сумме к 2021 году выросло на 90, также наблюдается увеличение количества остаточных озер внутри аласов, что говорит об осушении термокарстовых озер. При этом исследование показывает рост количества новых озер внутри и вне аласов, без учета количества остаточных озер, образовавшихся в результате распада крупного озера на более мелкие. Было отмечено появление новых аласов в 1976, 2013 и 2021 годах, что говорит об осушении некоторых озер и уменьшение суммарной площади. Анализ аномальных отклонений температур показывает общее увеличение после 1999, с этого же периода начинается рост количества и площадей озер.

Ключевые слова: термокарстовые озера, количественные закономерности, динамика озер, криолитозона, космические снимки

DOI: 10.31857/S0205961425020064, EDN: EJWNPV

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучению развития криогенных процессов в зоне распространения многолетнемерзлых пород уделяется особое внимание, за последнее десятилетие отмечается активизация термокарстовых процессов, приводящих к изменению ландшафтного облика территорий.

Изучению озерно-термокарстовых ландшафтов и их закономерностей посвящено множество работ, они исследовались такими авторами, как Викторов А.С. с соавт. (2021), Арэ Ф.Э. (1974), Романовский Н.Н. (1961) и др. Большое количество исследований направлено на выявление закономерностей развития термокарста и его динамики, например, количественная оценка изменений термокарстовых озер на севере полуострова Сьюард Аляски (Jones V.M. et al., 2011) за 1951, 1978 и 2006 годы показала, что увеличилось количество водных

объектов площадью более 0.1 га, однако общая площадь озер уменьшилась, причем большинство спущенных озер расширилось в результате деградации вечной мерзлоты на поверхности.

Исследование (Grosse, Guido, 2008) характеристик распределений термокарстовых озер в едомных отложениях на севере Сибири показало сильное различие распределений по регионам, так как они находятся под влиянием общей гидрологической и геоморфологической ситуаций. Эти же результаты подтверждаются Брыскиной Н.А., Полищук Ю.А. (2016), которые на основе дистанционных исследований динамики термокарстовых озер за 1973–2013 гг. в Арктической зоне Западной Сибири установили отличия динамики в разных ландшафтных зонах. В зоне арктической тундры Западной Сибири в среднем проявляется тенденция роста суммарной площади озер, в субарктической

тундре — тенденция ее сокращения, а в зоне лесотундры особенностей изменения площадей озер во времени не выявлено.

Кирпотин С.Н. с соавт. (2008) изучали динамику термокарстовых озер в различных ландшафтно-геоботанических условиях, показав, что протекающие в криолитозоне термокарстовые процессы имеют широтную специфику: озера в зоне сплошной вечной мерзлоты увеличивают свои площади, а в зоне прерывистой вечной мерзлоты сокращают их. На основе сравнения разновременных снимков с 1970-х по 2000 гг. Кравцовой В.И. (2021) были исследованы 39 участков в шести районах криолитозоны России. Была выявлена динамика термокарстовых озер, которая показала уменьшение площади одних озер на 2.9% и увеличение других на 1.2%, уменьшение озер обусловлено спуском эрозионной сетью, который может быть вызван двумя причинами: расширением борта озера до начала вершины эрозионного вреза и пяточной эрозией вреза водотока в сторону борта озера.

Исследование динамики численности и площади озер на о. Юкон за период 1951 по 2007 (Lantz T.C., Turner K.W., 2015) показало, что общая площадь озер сократилась на 6000 га (при изначальной площади озер в 121981 га), но при этом возникло 323 новых озера, что явилось, прежде всего, следствием быстрого и постоянного осушения 38 крупных озер, которые распались на множество остаточных водоемов. Частота осушения озер увеличилась более чем в 5 раз за последние десятилетия. Полишук Ю.М. (2017) по снимкам Landsat-8 оценил численность термокарстовых озер в зоне сплошной и прерывистой вечной мерзлоты Западно-Сибирской низменности за 2013 и 2014 гг. На территории 105 млн га средняя площадь озерного покрытия составляет 5.69 % территории. Небольшие озера (0.5–1.0 га) составляют около трети общего числа озер криолитозоны Западно-Сибирской низменности, однако площадь их зеркала не превышает 2.9% от общей площади озер.

Ряд исследований посвящен изучению изменения площади и численности озер под воздействием потепления климата, например, в работе J.M. Karlsson et al. (2014) на основе спутниковых снимков результаты выявили колебания общей площади и количества озер с течением времени: большинство озер появлялось и исчезало в течение трех различных периодов времени (1973, 1987–1988 и 2007–2009 гг.). Farquharson et al. (2019) показали, что в Канадской Арктике за 2003 по 2016 года в период аномально теплых лет средние индексы таяния оказались на 150–200% выше нормы за 1979–2000 года, что привело к опусканию поверхности до 90 см за 12 лет наблюдений. Значительное сокращение площади озер (Jennifer K. Roach, 2013) с большей вероятностью происходило в выжженных районах, на

хорошо дренированных почвах и дальше от рек, что указывает на деградацию вечной мерзлоты после пожаров в связи с потеплением климата, и усилению осушения озер.

Как один из наиболее динамичных и заозеренных участков распространения термокарстовых озер Яно-Индигирская низменность изучалась рядом ученых. Например, Кравцова В.И. (2009), Кравцова В.И. с соавт. (2016) отмечают на этой территории достаточно густую сеть термокарстовых озер крупного размера, для которых характерно преимущественно увеличение площади. Также термокарст в низовьях реки Индигирки изучался Говорушко С.М. (1977), Говорушко С.М., Втюрин Б.И. (2012), Мухин Н.И. (1974). Несмотря на многочисленные работы, анализ динамики численности и площади озер и возможная связь динамики с изменением климата требует дальнейших исследований.

Целью исследования являлся анализ динамики термокарстовых озер и оценка их количественных характеристик по материалам космической съемки, а также связи динамики термокарстовых озер с климатическими изменениями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследуемый участок эрозионно-термокарстовой равнины на территории Яно-Индигирской низменности расположен в 10-ти километрах от села Русское Устье Аллаиховского улуса и Русско-Устьинской протоки в низовьях реки Индигирки (рис. 1). Участок находится в зоне арктических пустынь и тундры с распространением сплошной вечной мерзлоты мощностью до 500 м со средними годовыми температурами ниже -9°C и льдистостью до 80% (Ершов Э.Д. с соавт., 1989). Климат района суровый, зимний период длится с сентября по май со средней температурой в январе -38°C . Лето пасмурное и холодное, средние температуры июля $+5^{\circ}\text{C}$, $+7^{\circ}\text{C}$. В течение года выпадает не более 150–250 мм осадков.

Участок находится в зоне сплошного залегания многолетнемерзлых пород, с повсеместно развитыми аласами (хасыреями) и котловинами, заполненными озерами. Поверхность участка сложена преимущественно озерно-болотными, озерными и озерно-аллювиальными отложениями. Основную поверхность слагают озерно-болотные отложения IbIV₁. Они приурочены к площадям развития отложений едомного надгоризонта верхнего неоплейстоцена, являясь результатом термокарстовой переработки последних. Мелкие котловины и центральные части древних аласов сложены преимущественно тонкослоистыми ленточноподобными глинами, алевролитами, насыщенными раститель-



Рис. 1. Расположение участка исследования.

ными остатками, включая торф, реже торфяниками. Содержат ледяные жилы мощностью до 1.5 м. Характерной особенностью их является частое отсутствие в разрезах собственно аласной фации, что, возможно, служит доказательством незавершенности процесса осадконакопления.

Методика исследования включала в себя измерения площади озер по космическим снимкам за разные периоды времени (рис. 2).

Использовались снимки Corona за 1966 и 1976 года (5.7 м/пикс и 0.9 м/пикс), Landsat-7 за 1999 и 2007 года (15 м/пикс), Sentinel-2 за 2013 и 2021 года (10 м/пикс), а также высокодетальный снимок WorldView-2 за 2019 год. Таким образом, наблюдения велись в следующие периоды:

1. с 1967 по 1976 (разница 10 лет);
2. с 1976 по 1999 (разница 23 года);
3. с 1999 по 2007 (разница 8 лет);
4. с 2007 по 2013 (разница 6 лет);
5. с 2013 по 2021 (разница 8 лет).

Точность измерений площади озера и его динамики зависела от разрешения спутниковых сним-

ков. Наиболее сильные погрешности оцениваются в 15–20 м при использовании снимков с разрешением 15 м/пикс (1999 г., 2007 г. и 2013 г.), на которых мелкие озера практически не различимы, а границы озер размыты. Для снимков Corona за 1966 и 1976 года, а также для снимков 2021 года, погрешность измерений оценивается 5–5.7 м (рис. 3).

Помимо космических снимков была использована цифровая модель рельефа ArcticDEM (2 м/пикс) для анализа поверхности участка и определения характеристик рельефа. Анализ динамики площадей озер строился на основе классификации озер и аласов, включающей шесть классов для озер и два класса для аласов, представленных в таблице 1.

Анализ температур строился на основе климатических данных Global Surface Temperature Analysis (NOAA Global Temp) за 1956–2022 года.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ рельефа

Анализ современного рельефа показал, что выбранный участок можно разделить на три части с высотами 5 м н.у.м., 12 м н.у.м., 40 м н.у.м. Выде-

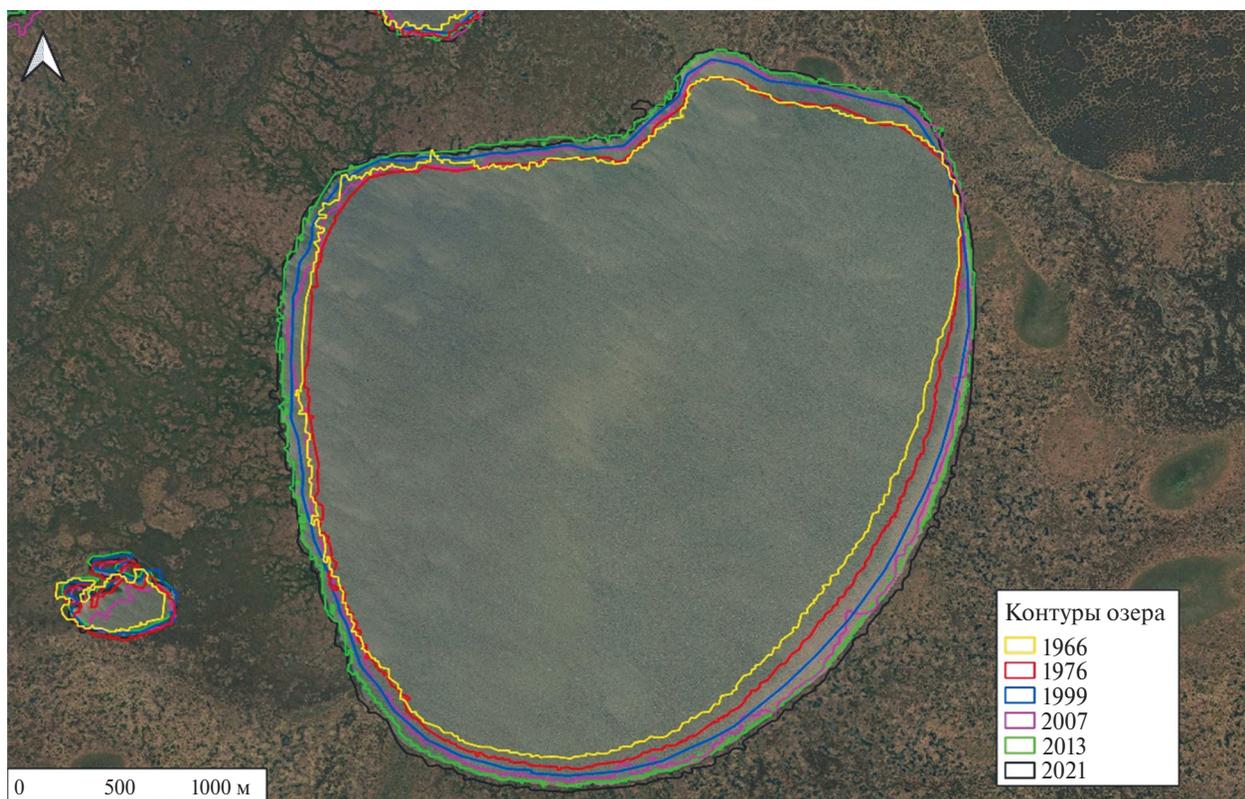


Рис. 2. Пример оцифрованных контуров озера за разные сроки наблюдения.



Рис. 3. Пример различия в разрешении снимков: *а* – снимок Corona 1966 г. с разрешением 5.7 м/пикс; *б* – снимок Landsat-7 2007 г. с разрешением 15 м/пикс; *в* – снимок 2021 г. с разрешением 10 м/пикс.

ленные части имеют схожую ландшафтную структуру, но при этом, видимо, имеют различные стадии проработки термокарстовыми процессами (рис. 4). Можно предположить, что высоты зоны уровня 3 (40 м н.у.м.) соответствуют исходной поверхности. Зона 2 (12 н.у.м.) проработана термокарстовым процессом и прошла около 8 стадий полного развития аласов по всей территории. Зона 1 (5 м н.у.м.) проработана термокарстовым процессом и прошла около 10 стадий полного развития аласов по всей территории.

Озера и аласы имеют среднюю глубину до 3 м и не имеют особой связи с порядком водотока. Таким образом, как озеро, так и алас могут оказываться как на истоке водотока, так и на среднем его течении (рис. 5).

Состояние озера на 2021 год

Выбранный участок имеет площадь 4124.99 км², по современному состоянию на нем выявлено 2485 озер общей площадью 949.4 км², что составляет 23% от площади участка. Также на участке выделено

Таблица 1. Классификация озер и аласов

Классы	Описание	Пример
Классификация озер		
1	Остаточное озеро внутри аласа в результате высыхания или сливания его эрозионной деятельностью	
2	Типичное термокарстовое озеро вне аласа	
3	Вторично образовавшееся озеро внутри аласа	
4	Сливающиеся озера вне аласа	
5	Большое термокарстовое озеро округлой формы внутри аласа	

Таблица 1. Окончание

Классы	Описание	Пример
Классификация озер		
6	Сливающиеся озера внутри аласа	
Классификация аласов		
1	Самостоятельный алас, у которого выделяются границы	
2	Несколько слившихся аласов	

303 аласа площадью 2590.9 км² (62.8% от площади участка). Большинство озер относятся к классу 3 (вторично образовавшееся озеро внутри аласа), наименьшее количество озер принадлежит классам слившихся озер внутри и вне аласов.

Статистическая обработка данных по площадям озер показала, что озера за 2021 год классов 5 и 6 подчиняются логнормальному распределению. Гамма-распределению соответствуют озера только класса 3 (табл. 2).

Таблица 2. Статистическая обработка данных по площадям озер

Классы	Логнормальное распределение	Гамма распределение
1	-	-
2	-	-
3	-	0.17755
4	-	-
5	0.07954	-
6	0.03068	-

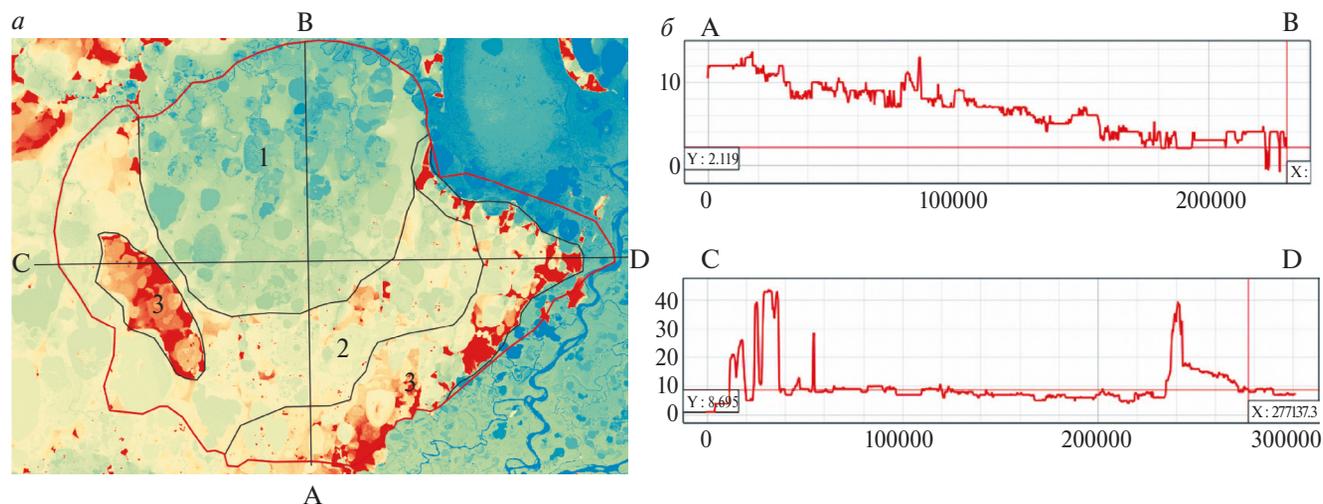


Рис. 4. а – уровни рельефа участка; б – профили рельефа.

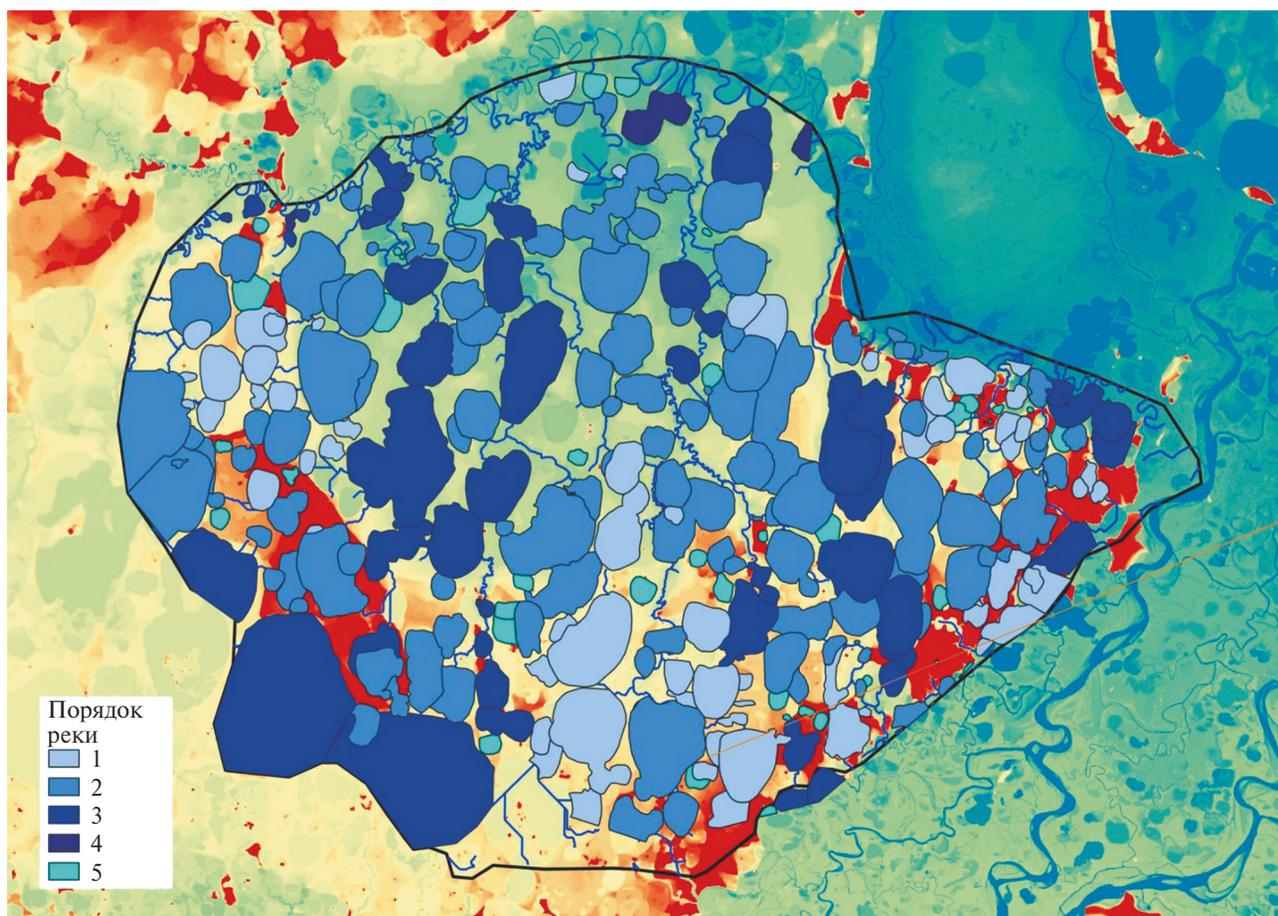


Рис. 5. Распределение аласов по порядку водотоков.

Динамика озер

Динамика площадей и количества термокарстовых озер имеет разнонаправленный характер, то есть за весь временной период наблюдалось как увеличение площади одних озер, так и уменьшение

других, а также появление новых озер и одновременно полное осушение других. На рис. 6 показано схематичное изображение динамики термокарстового процесса. На первом этапе (а) происходит увеличение площади озера, затем береговая линия

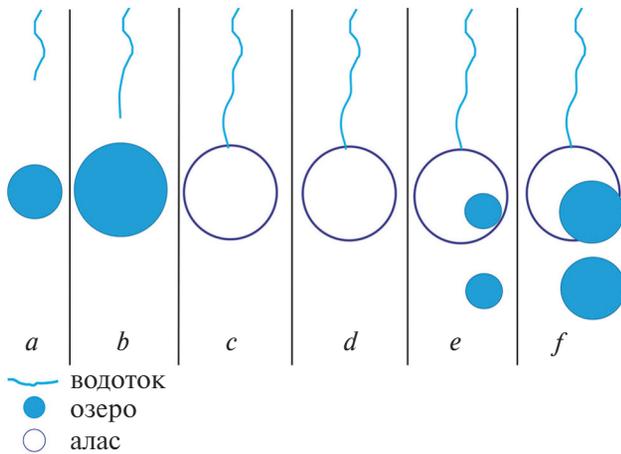


Рис. 6. Схематичное изображение процесса осушения и увеличения термокарстового озера.

постепенно доходит до эрозионного вреза (водотока) (b), и начинается этап спуска озера (c). Внутри образовавшегося аласа появляется новое озеро (e), которое увеличивается в размерах и может выйти за пределы старого аласа (f).

Результаты исследования демонстрируют общее увеличение площадей озера за весь срок наблюдения на 21%. В 1999 и 2013 годах площади озера увеличились на 3.1 % и 20% соответственно, при этом в 1976 году отмечается небольшое уменьшение на 0.2%, в 2007 на 0.3% и в 2021 на 0.5% (рис. 7). Площади аласов при этом практически не меняются.

Также выявлена динамика площадей озера отдельно по классам (рис. 8).

У озера класса 1 наблюдается уменьшение площадей за весь период наблюдений. Озера класса 2 увеличиваются, начиная с 1999 года, но в 2021 наблюдается небольшое снижение. У озера класса 3 наблюдается рост в 1976 и 2007, в остальные года происходит уменьшение площади.

классы	1976	1999	2007	2013	2021
1	85.108	17.838	-51.39	34.765	-21.579
2	-1.014	3.519	1.295	3.6515	-1.120
3	14.550	-43.42	43.986	-44.07	-58.929
4	-0.0294	0.0505	0.0146	0.0780	-0.0286
5	-89.97	111.087	23.842	5.4671	32.605
6	-13.125	65.663	-20.62	24.385	47.341

Рис. 7. Общая динамика озера, км². Оранжевым цветом показано уменьшение площади, синим цветом – увеличение.

Озера класса 4 испытывают очень небольшие изменения, практически не меняются.

Площади озера класса 5 испытывают разнонаправленную динамику, уменьшение до 1999 года, затем увеличение. Для площадей озера класса 6 характерно постоянное увеличение площадей озера, кроме 1976 и 2007 годов, при этом эти озера имеют наибольшую площадь в пределах участка.

Количество озера в общей сумме к 2021 году выросло на 90. Появление новых озера отмечается у класса 2 и 3, когда за 1999 год появилось 40 озера класса 3 и 5 озера класса 2. Также наблюдается постоянное увеличение количества озера класса 1, что показывает осушение озера других классов и превращение их в остаточные озера внутри аласов. По количеству аласа также практически остаются без изменений, было отмечено появление новых аласов в 1976, 2013 и 2021 годах, что говорит об осушении некоторых озера и уменьшение суммарной площади.

Анализ климатических данных

Был проведен анализ климатических данных за период 1956–2022 гг. За 66-летний период наблюдений они показывают характерные аномалии температур на территории исследуемого участка (рис. 9).

В зимние периоды наблюдались теплые зимы за 1996 и 2006, с 2010 года начиналось повышение температуры с максимальной отметкой в +4°C. В летний период аномально холодные температуры зафиксированы за 1979, 1984 и 1996 года, с 2010 года началось повышение температуры, которое продолжается в настоящее время.

Таким образом, для периодов наблюдений зафиксированы следующие аномалии (табл. 3).

В таблице показана частота положительных отклонений температур за зимний и летний сезоны, которая рассчитывается как количество встречающихся за трехмесячный период положительных отклонений за выбранные отрезки времени с 1967 по 2021 гг.

Анализ частоты теплых зим и теплого лета показывает, что их количество начинает расти с 1999 года. Была проанализирована зависимость изменения площади озера от накопленных отклонений

Таблица 3. Аномалии, зафиксированные в периоды наблюдений

№	Период (гг)	Продолж. (лет)	Теплые зимы (шт/год)	Теплые лета (шт/год)
1	1967–1976	10	0.3	0.5
2	1976–1999	23	0.3	0.3
3	1999–2007	8	0.4	0.5
4	2007–2013	6	0.66	0.66
5	2013–2021	8	0.875	0.625

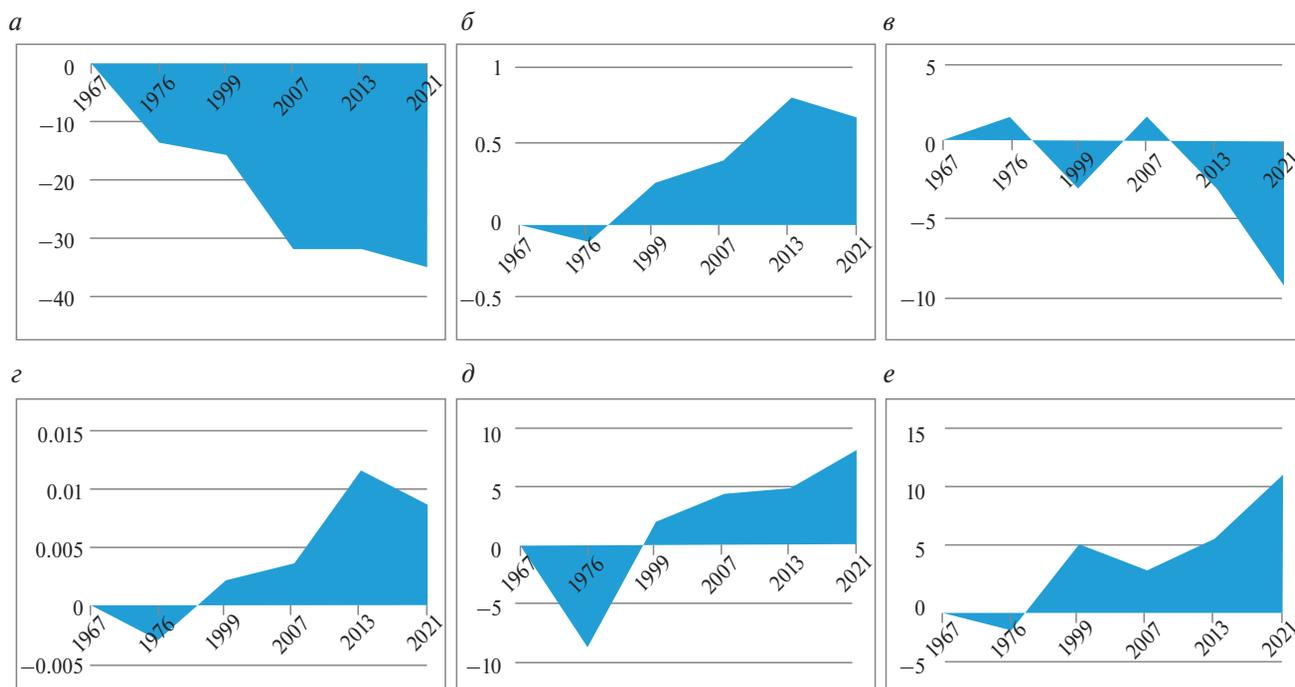


Рис. 8. Изменение площадей озер (км², разница с предыдущим периодом), а – класс 1, б – класс 2, в – класс 3, г – класс 4, д – класс 5, е – класс 6.

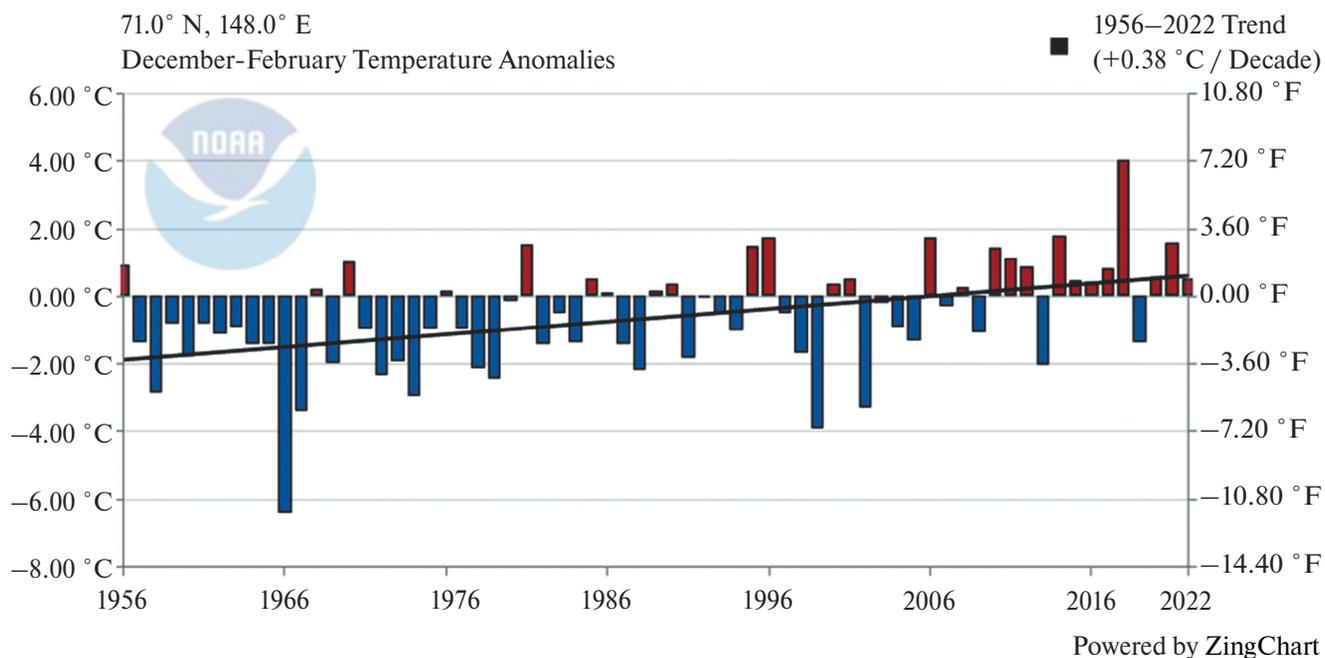


Рис. 9. Климатические данные за 66-летний период: зима (остальные сезоны года имеют аналогичный тренд).

температур. Графики показывают в целом схожий рисунок, когда идет постепенное и постоянное увеличение летних температур с 1956 года и заметное увеличение осенних и зимних температур после 1999 года, что коррелирует с ростом площадей озер также после 1999 года (рис. 10).

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование показывает, что в целом для озер всех классов характерно увеличение как площади, так и количества, начиная с 1999 года, при этом рост количества озер обусловлен появлением но-

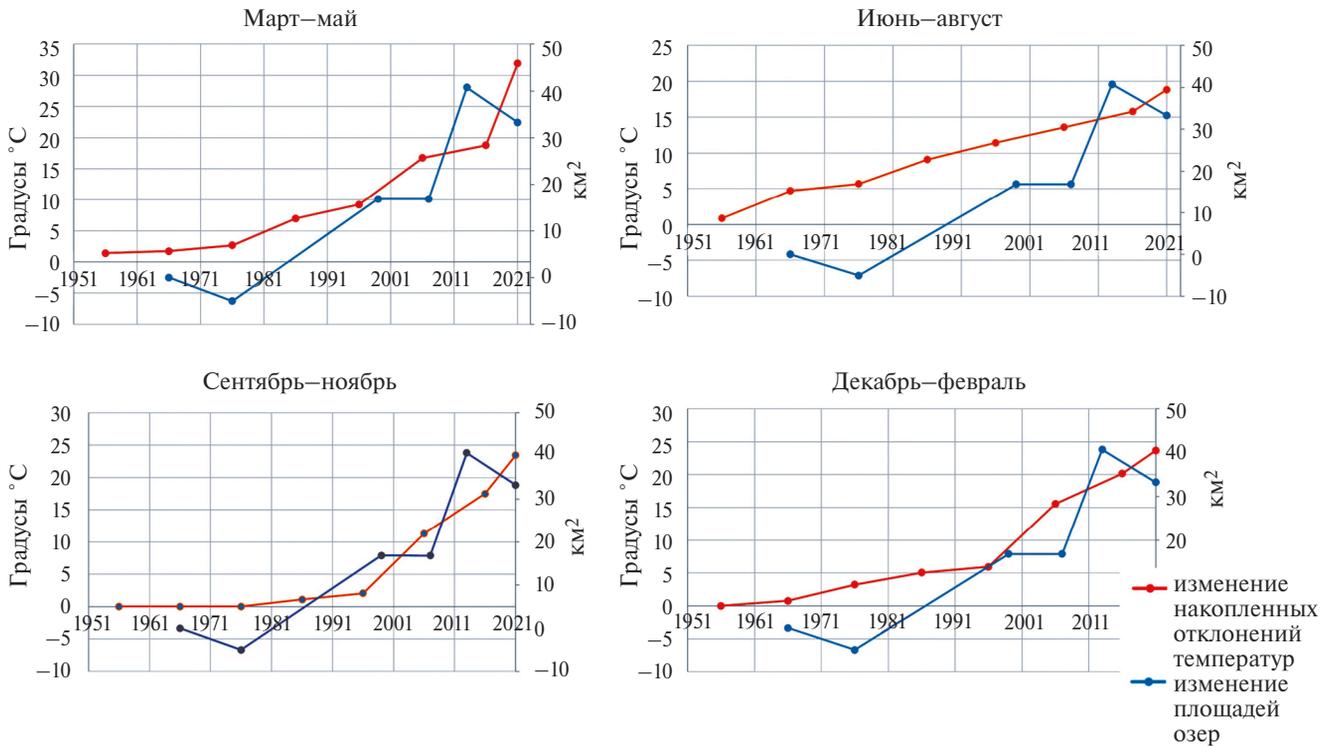


Рис. 10. Зависимость изменения площадей озера от изменения накопленных отклонений температур по сезонам.

вых термокарстовых озера, без учета остаточных озера. Только для класса остаточных озера внутри аласа характерно уменьшение площади. Можно предположить, что для этих озера продолжается процесс осушения озера и превращения его в алас. При этом для вторичных, вновь появившихся озера внутри аласа фиксируется обратный процесс – слияния и развития озера. Таким образом, для некоторых аласов характерно развитие термокарста, а для некоторых продолжение процесса осушения озера.

Процесс появления новых аласов на территории не такой активный, всего за 55-летний период исследования было зафиксировано появление 4 новых аласа. Можно предположить, что один алас в среднем появляется раз в 14 лет. Однако, определение цикла образования аласов является более сложной задачей, исследование чередования влажных и засушливых периодов и изменчивости условий показывает вековые и внутривековые циклы, в которых усыхание озера повторяется в среднем раз в 150–180 лет (Босиков Н.П. с соавт., 2012). На исследуемом участке всего выделено 303 аласа.

Увеличение площади озера и увеличение частоты теплых зим и теплого лета характерно для периода после 1999 года. Для этого же периода характерно увеличение площадей озера для большинства классов. Результаты анализа, в целом подтверждают более ранние исследования изменения численности и площадей термокарстовых озера, например, (Кирпотин с соавт., 2008; Брыксина, Полищук, 2015) об об-

щем увеличении численности озера под воздействием потепления климата и деградации вечной мерзлоты.

Анализ распределений термокарстовых озера за 2021 год показал логнормальное распределение для классов 5 и 6 и гамма-распределение для класса 3, что не противоречит исследованиям (Викторов с соавт., 2021; Викторов с соавт., 2015), в которых подтверждается, что для эрозионно-термокарстовых равнин характерно как логнормальное распределение, так и гамма-распределение.

ВЫВОДЫ

Полученные данные анализа позволяют сделать следующие выводы:

Для озера всех классов в целом характерно увеличение площадей, начиная с 1999 года. За весь период наблюдений появилось 90 новых озера. Для класса остаточных озера внутри аласа характерно уменьшение площади. Можно предположить, что для этих озера продолжается процесс осушения озера. Для вторичных, вновь появившихся озера внутри аласов фиксируется обратный процесс – слияния и увеличения площадей озера. Для некоторых аласов характерно развитие термокарста, а для некоторых продолжение процесса осушения озера.

Не выявлено связи появления аласа и порядка водотока. Алас может появиться как на водотоке низкого порядка, так и среднего порядка. Было

выделено 3 зоны по высотным уровням. Для зоны 1 с минимальными высотными уровнями значительного роста озер не установлено. Для зон 2 и 3 среднего и высокого уровня – отмечается активный рост озер за последнее время. Процесс появления новых аласов на территории не такой активный, всего за 55-летний период исследования было зафиксировано появление 4 новых аласа.

Полученные данные динамических параметров озер и данные климатических наблюдений в целом коррелируют друг с другом. Максимум роста площадей озер отмечается после 1999 года, также растут аномалии зимних и летних температур

Площади озер класса 5 (большое озеро внутри аласа) и 6 (слившееся озеро внутри аласа) за 2021 соответствуют логнормальному распределению, класс 3 (вторичное озеро внутри аласа) соответствует гамма-распределению.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках госзадания по теме № FMWM-2022-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арз Ф. Э. Особенности переработки берегов термокарстовых озер Центральной Якутии / Арз Ф. Э., Балобаев В. Т., Босиков Н. П. // Озера криолитозоны Сибири. Новосибирск: 1974. С. 39–53.
- Босиков Н. П., Исаев А. П., Иванова Е. И., Захарова В. И., Сивцова Л. В., Иванова А. П., Семенов С. Г., Аммосова В. Н., Порядина Л. Н., Исакова В. Г. Ритмы развития аласных экосистем в Центральной Якутии // Наука и Образование. 2012. № 2. С. 52–57.
- Брыксина Н. А., Полищук Ю. М. Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 2. С. 114–120.
- Брыксина Н. А., Полищук Ю. М. Изучение распределения площадей термокарстовых озер Арктической зоны Западной Сибири и их динамики по космическим снимкам // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 6. С. 13–21.
- Викторов А. С., Орлов Т. В., Дорожко А. Л. Сравнительный анализ распределений площадей озер в пределах озерно-термокарстовых и эрозионно-термокарстовых равнин // Геоморфология. 2021. 52(2). С. 29–38.
- Викторов А. С., Капралова В. Н., Трапезникова О. Н. Математическая модель морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин в изменяющихся климатических условиях // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 2. С. 26–34.
- Втюрин Б. И., Говорушко С. М. “Причуды” термокарста // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 4. С. 42–44.
- Говорушко С. М. Подземные льды и термокарст в низовьях р. Индигирки // Полевые и экспериментальные исследования мерзлых толщ. 1981. Якутск. ИМ СО АН СССР. С. 34–39.
- Еришов Э. Д., Логинов В. Ф., Романовский Н. Н., Сычев К. И. (Ред.). Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. Москва: Недра, 1989. 515 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 // Вестник Томского Государственного Университета. 2008. № 311. С. 185–189.
- Кравцова В. И., Родионова Т. В. Исследование динамики площади и количества термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 1. С. 81–89.
- Кравцова В. И. Распространение термокарстовых озер в России в пределах зоны современной мерзлоты // Вестник Московского Университета. 2009. Сер. 5. География. № 3. С. 33–41.
- 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. Югорский Государственный университет. Т. 1. С. 96–103.
- Мухин Н. И. Особенности возникновения и развития термокарстовых озер на территории Яно-Индигирской низменности // Озера криолитозоны Сибири. Новосибирск: Наука. 1974.
- Романовский Н. Н. Эрозионно-термокарстовые котловины на севере приморских низменностей Якутии и Новосибирских островах // Мерзлотные исследования. 1961. Вып. 1. С. 124–144.
- Farquharson L. M., Romanovsky V. E., Cable W. L., Walker D. A., Kokelj S. V., & Nicolsky, D. Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian High Arctic. *Geophysical Research Letters*. 2019. 46. 6681–6689. DOI: 10.1029/2019GL082187.
- Grosse, Guido, et al. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia. // Ninth International Conference on Permafrost 2008. P. 551–556.
- Jones B. M. et al. Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula, Alaska. // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2011. Vol. 116. № G2.
- Johanna Mård Karlsson. Temporal Behavior of Lake Size-Distribution in a Thawing Permafrost Landscape in Northwestern Siberia. // *Remote Sensing*. 2014. 6. P. 621–636. DOI: 10.3390/rs6010621.
- Kravtsova V. I. Research of the dynamics of the area and number of thermokarst lakes in different regions of the permafrost zone of Russia using satellite images // *Cryosphere of the Earth*. 2016. Vol. 20. № 1. 81–89.
- Lantz T. C., Turner K. W. Changes in lake area in response to thermokarst processes and climate in Old Crow Flats, Yukon // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2015. Vol. 120. № 3. P. 513–524.
- Polishchuk Yu. M., Bogdanov A. N., Polishchuk V. Yu., Manasypov R. M., Shirokova L. S., Kirpotin S. N., Pokrovsky O. S. Size Distribution, Surface Coverage, Water, Carbon, and Metal Storage of Thermokarst Lakes in the Permafrost Zone of the Western Siberia Lowland // *Water*. 2017. 9. 228. P. 1–18.
- Roach J. K., Griffith B., Verbyla D. Landscape influences on climate-related lake shrinkage at high latitudes // *Global Change Biology*. 2013. 19(7). P. 2276–2284. DOI: 10.1111/gcb.12196.

Analysis of The Dynamics of Lake Thermokarst Activation for the Period 1966-2021 (Using the Example of a Swampy Area of the Yana-Indigirka Lowland)

T. V. Orlov¹, V. V. Bondar¹, M. V. Arkhipova¹

¹*Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS (IEG RAS), Moscow, Russia*

The activation of thermokarst processes due to climate warming over the past decades in the permafrost zone is observed almost everywhere. Numerous studies are dedicated to examining these processes, with special attention given to the quantitative patterns of thermokarst lakes and their dynamics. The goal of this research was to analyze the dynamics of thermokarst lakes and assess their quantitative characteristics based on satellite imagery, as well as to explore the relationship between the dynamics of thermokarst lakes and climate changes. The study was conducted using a section of the Yana-Indigirka Lowland in northern Yakutia, based on a series of satellite images from Corona, Landsat 7, and Sentinel-2 over six observation periods: 1966, 1976, 1999, 2007, 2013, and 2021, as well as the ArcticDEM digital elevation model (2 m/pixel). A total of 248 lakes and 303 alas depressions were identified in the study area, and the lakes were classified into six main types based on their form and location. The research revealed a general increase in both the area and number of lakes over the entire observation period, although the dynamics of the lakes were variable. Residual lakes within alases consistently showed a decrease in area, indicating further drying, whereas thermokarst lakes within alases grew in 1976 and 2007, but in other years, their overall area decreased. In 1999 and 2013, lake areas increased by 3.1% and 20%, respectively, while in other years, there was a slight reduction in lake area. The total number of lakes increased by 90 by 2021. New lakes were noted in class of lakes outside the alases and lakes in alases categories. There was also an increase in the number of class of residual lakes, indicating the drying of lakes in other classes and their transformation into residual lakes within alases. The emergence of new alases was observed in 1976, 2013, and 2021, indicating the drying of some lakes and a reduction in total lake area. An analysis of temperature anomalies shows a general increase after 1999, with this period also marking the beginning of the rise in the number and area of lakes.

Keywords: thermokarst lakes, quantitative patterns, lake dynamics, cryolithozone, space images

REFERENCES

- Are F.E.* Osobennosti pererabotki beregov termokarstovykh ozer Tsentral'noy Yakutii [Features of processing the shores of thermokarst lakes in Central Yakutia] / *Are F.E., Balobayev V.T., Bosikov N.P.* // *Ozera kriolitozony Sibiri*. Novosibirsk, 1974. P. 39–53. (In Russian).
- Bosikov N.P., Isayev A.P., Ivanova Ye.I., Zakharova V.I., Sivtsova L.V., Ivanova A.P., Semenov S.G., Ammosova V.N., Poryadina L.N., Isakova V.G.* Ritmy razvitiya alasnykh ekosistem v Tsentral'noy Yakutii [Rhythms of development of alas ecosystems in Central Yakutia] // *Nauka i Obrazovaniye*. 2012. № 2. P. 52–57. (In Russian).
- Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M.* Analiz izmeneniya chislenosti termokarstovykh ozer v zone mnogoletney merzloty Zapadnoy Sibiri na osnove kosmicheskikh snimkov [Analysis of changes in the number of thermokarst lakes in the permafrost zone of Western Siberia based on space images] // *Kriosfera Zemli*. 2015. T. XIX. № 2. P. 114–120. (In Russian).
- Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M.* Izucheniye raspredeleniya ploshchadey termokarstovykh ozer Arkticheskoy zony Zapadnoy Sibiri i ikh dinamiki po kosmicheskim snimkam [Study of the distribution of the areas of thermokarst lakes in the Arctic zone of Western Siberia and their dynamics based on space images] // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geosursov*. 2016. T. 327. № 6. P. 13–21. (In Russian).
- Viktorov A.S., Orlov T.V., Dorozhko A.L.* Sravnitel'nyy analiz raspredeleniy ploshchadey ozer v predelakh ozer-no-termokarstovykh i erozionno-termokarstovykh ravnin [Comparative analysis of the distribution of lake areas within lake-thermokarst and erosion-thermokarst plains] // *Geomorfologiya*. 2021. 52(2). P. 29–38. (In Russian).
- Viktorov A.S., Kapralova V.N., Trapeznikova O.N.* Matematicheskaya model' morfologicheskoy struktury ozer-no-termokarstovykh ravnin v izmenyayushchikhsya klimaticheskikh usloviyakh [Mathematical model of the morphological structure of lake-thermokarst plains in changing climatic conditions] // *Kriosfera Zemli*. 2015. T. XIX. № 2. P. 26–34. (In Russian).
- Vityurin B.I., Govorushko S.M.* "Prichudy" termokarsta ["Whims" of thermokarst] // *Kriosfera Zemli*. 2012. T. XVI. № 4. P. 42–44. (In Russian).
- Govorushko S.M.* Podzemnyye l'dy i termokarst v nizov'yakh r. Indigirki [Underground ice and thermokarst in the lower reaches of the Indigirka River] // *Polevyeye i eksperimental'nyye issledovaniya merzlykh tolshch*. 1981. Yakutsk. IM SO AN SSSR. P. 34–39. (In Russian).
- Yershov E.D., Loginov V.F., Romanovskiy N.N., Sychev K.I.* (Red.). *Geokriologiya SSSR. Vostochnaya Sibir' i Dal'niy Vostok* [Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East.] Moskva: Nedra, 1989. 515 p. (In Russian).
- Kirpotin S.N., Polishchuk Yu.M., Bryksina N.A.* Dinamika ploshchadey termokarstovykh ozer v sploshnoy i preryvistoy kriolitozonakh Zapadnoy Sibiri v usloviyakh global'nogo po-tepleniya [Dynamics of the areas of thermokarst lakes in continuous and discontinuous cryolithozones of Western Siberia under global warming] // *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2008. № 311. P. 185–189. (In Russian).

- Kravtsova V.I., Rodionova T.V.* Issledovaniye dinamiki ploshchadi i kolichestva termokarstovykh ozer v razlichnykh rayonakh kriolitozony Rossii po kosmicheskim snimkam [Study of the dynamics of the area and number of thermokarst lakes in various regions of the cryolithozone of Russia based on space images] // *Kriosfera Zemli*. 2016. T. XX. № 1. P. 81–89. (In Russian).
- Kravtsova V.I.* Rasprostraneniye termokarstovykh ozer v Rossii v predelakh zony sovremennoy merzloty [Distribution of thermokarst lakes in Russia within the modern permafrost zone] // *Vestnik Moskovskogo Universiteta*. 2009. Ser. 5. Geografiya. № 3. P. 33–41. (In Russian).
- Kravtsova V.I., Tarasenko T.V.* Izucheniye i kartografirovaniye dinamiki termokarstovykh ozer na territorii Zapadnoy Sibiri po raznovremennym kosmicheskim snimkam [Study and mapping of thermokarst lake dynamics in Western Siberia using space images taken at different times] // *Dinamika okruzhayushchey sredy i global'nyye izmeneniya klimata*. 2010. Yugorskiy Gosudarstvennyy universitet. T. 1. P. 96–103. (In Russian).
- Mukhin N.I.* Osobennosti vozniknoveniya i razvitiya termokarstovykh ozer na territorii Yano-Indigirskoy nizmennosti [Features of the emergence and development of thermokarst lakes in the Yana-Indigirka lowland] // *Ozera kriolitozony Sibiri*. Novosibirsk: Nauka. 1974. (In Russian).
- Romanovskiy N.N.* Eroziionno-termokarstovyye kotloviny na severe primorskikh nizmennostey Yakutii i Novosibirskikh ostrovakh [Erosion-thermokarst basins in the northern coastal lowlands of Yakutia and the New Siberian Islands] // *Merzlotnyye issledovaniya*. 1961. Vyp. 1. P. 124–144. (In Russian).
- Farquharson L.M., Romanovsky V.E., Cable W.L., Walker D.A., Kokelj S.V., Nicolsky D.* Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian High Arctic. *Geophysical Research Letters*. 2019. V. 46. P. 6681–6689. DOI: 10.1029/2019GL082187.
- Grosse Guido et al.* Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia. // *Ninth International Conference on Permafrost 2008*. P. 551–556.
- Jones B.M. et al.* Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula, Alaska. // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2011. Vol. 116. № G2.
- Johanna Mård Karlsson.* Temporal Behavior of Lake Size-Distribution in a Thawing Permafrost Landscape in Northwestern Siberia // *Remote Sensing*. 2014. 6. P. 621–636. DOI: 10.3390/rs6010621.
- Kravtsova V.I.* Research of the dynamics of the area and number of thermokarst lakes in different regions of the permafrost zone of Russia using satellite images // *Cryosphere of the Earth*. 2016. vol. 20. № 1. P. 81–89.
- Lantz T.C., Turner K.W.* Changes in lake area in response to thermokarst processes and climate in Old Crow Flats, Yukon // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2015. Vol. 120. № 3. P. 513–524.
- Polishchuk Yu.M., Bogdanov A.N., Polishchuk V.Yu., Manasy-pov R.M., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Pokrovsky O.S.* Size Distribution, Surface Coverage, Water, Carbon, and Metal Storage of Thermokarst Lakes in the Permafrost Zone of the Western Siberia Lowland // *Water*. 2017. 9. 228. P. 1–18.
- Roach J.K., Griffith B., Verbyla D.* Landscape influences on climate-related lake shrinkage at high latitudes // *Global Change Biology*. 2013. 19(7). P. 2276–2284. DOI: 10.1111/gcb.12196.