

Анализ взаимосвязи изменений климата и динамики термокарстовых озёр в арктической зоне Таймыра

В. Ю. Полищук^{1,2}, М. А. Куприянов³, Ю. М. Полищук³

¹ *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
Томск, 634055, Россия*

E-mail: liquid_metal@mail.ru

² *Томский политехнический университет, Томск, 634004, Россия*

³ *Югорский НИИ информационных технологий, Ханты-Мансийск, 628011, Россия
E-mail: yupolishchuk@gmail.com*

Рассмотрены вопросы проведения анализа взаимосвязи между изменениями климата и динамикой площадей термокарстовых озёр в Таймырской Арктике за последние 35 лет. С использованием спутниковых снимков среднего разрешения Landsat-4, -5, -7, -8 за период 1985–2020 гг. сформирован временной ряд средних значений площади озёр, полученных усреднением результатов дистанционных измерений площадей озёр на 25 тестовых участках, расположенных на территории исследования. Анализ временного ряда озёрных площадей показывает в среднем увеличение размеров озёр за период исследования. Временной ряд среднегодовой температуры воздуха, сформированный методом реанализа с использованием системы ERA-5, демонстрирует в среднем повышение температуры как результат потепления климата. Временной ряд данных о годовой сумме осадков за период исследований получен по данным метеостанции, расположенной на исследуемой территории. На основе многомерного регрессионного анализа полученных временных рядов площадей озёр и климатических параметров найдено уравнение множественной регрессии, определяющее связь величины площади озёр с изменениями среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы осадков. Уравнение показало, что наибольший вклад в увеличение размеров термокарстовых озёр на территории исследований даёт повышение температуры, а влияние осадков пренебрежимо мало.

Ключевые слова: космические снимки, регрессионный анализ, климатические изменения, среднегодовая температура, уровень осадков, реанализ, многолетняя мерзлота, термокарстовые озёра, Таймырская Арктика

Одобрена к печати: 23.08.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-193-200

Введение

Прогнозируемое продолжение повышения температуры многие специалисты связывают с эмиссией метана и углекислого газа в атмосферу, основными источниками которых на северных территориях выступают болота и термокарстовые озёра. По некоторым оценкам, значительная часть мирового объёма природного метана сосредоточена в Сибири, большую часть территории которой занимают болотно-озёрные ландшафты с множеством озёр разных размеров и возраста. В связи с труднодоступностью территорий в зоне мерзлоты исследования таких ландшафтов невозможны без использования дистанционных методов. В настоящее время накоплен большой опыт применения космических снимков в изучении термокарстовых процессов в зонах многолетней мерзлоты, демонстрирующий эффективность дистанционных методов.

Известно, что таяние мерзлоты в условиях современного потепления климата приводит к ускорению термокарстовых процессов, что проявляется в изменении размеров и числа термокарстовых озёр в зоне мерзлоты. Исследования (Полищук и др., 2017; Kirpotin et al., 2009; Luoto, Seppala, 2003; Riordan et al., 2006), проведённые на территории Аляски, Скандинавии и Сибири, выявили зависимость динамики термокарстовых процессов от климатических изменений. Наиболее чувствительным индикатором влияния климатических изменений на

термокарстовые процессы становится площадь термокарстовых озёр, что иллюстрируется результатами дистанционных исследований в разных регионах мира, изложенных, в частности, в работах (Luoto, Seppala, 2003; Polishchuk et al., 2015; Riordan et al., 2006). Однако некоторые исследователи динамики термокарстовых процессов в зоне мерзлоты (см., например, публикацию (Кравцова, Родионова, 2016)), отрицают зависимость наблюдаемых изменений термокарстовых озёр от климата. Это может рассматриваться как следствие недостаточной изученности взаимосвязи термокарстовых процессов с изменениями климата, что не позволяет решать задачи формирования обоснованных прогнозов динамики термокарстовых процессов в условиях климатических изменений на арктических территориях.

К числу наименее исследованных арктических регионов относится перспективный для хозяйственного освоения Таймыр — один из самых холодных регионов Российского Крайнего Севера. В связи с этим цель работы заключается в исследовании взаимосвязи динамики термокарстовых озёр с климатическими изменениями в Таймырской тундре по спутниковым снимкам Landsat.

Методы и данные

Приведём далее краткое физико-географическое описание исследуемой территории (Таймыр..., 2017). Таймырский п-ов, один из самых северных полуостровов Евразии, находится на севере Красноярского края за Северным полярным кругом, между Енисейским заливом Карского моря и Хатангским заливом моря Лаптевых. Протяжённость с запада на восток — около 1000 км, с юга на север — более 500 км. В рельефе выделяются: на севере — узкая полоса низменной равнины вдоль побережья Карского моря, в центре — горы Бырранга (высота до 1125 м), на юге — Северо-Сибирская низменность. Таймыр находится в арктическом и субарктическом климатических поясах, что определяет суровость климата, характеризующегося продолжительной холодной зимой (средняя температура января составляет -30°C ; абсолютный минимум температуры равен -62°C) и коротким прохладным летом (средняя температура июля — от $1,5^{\circ}\text{C}$ на севере до 13°C на юге). Ежегодно выпадает от 200 мм (на севере) до 400 мм (на юге) осадков. Повсеместны многолетняя мерзлота и ископаемые льды.

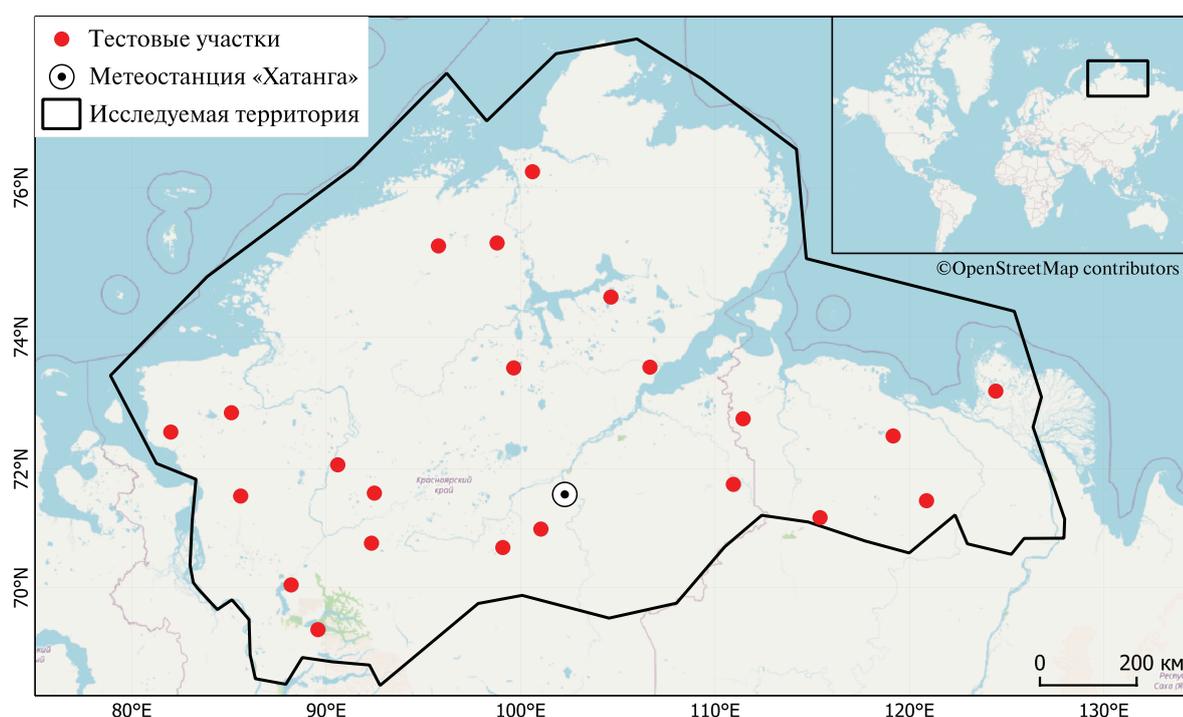


Рис. 1. Картограмма расположения тестовых участков на исследуемой территории

Площадь исследуемой территории Таймырской Арктики составляет 1,01 млн км². Для получения данных о площадях озёр на исследуемой территории были выбраны 25 тестовых участков, картосхема расположения которых представлена на *рис. 1* (см. с. 194). Тестовые участки (ТУ) выбирались достаточно равномерно по территории исследований и так, чтобы они были приблизительно одинаковыми по площади. В среднем площадь ТУ составляла около 3500 га. Суммарная площадь исследованных тестовых участков составила 815 км², т. е. приблизительно 0,1 % площади исследуемой территории.

На каждый из тестовых участков было собрано не менее 3–5 безоблачных снимков Landsat. Для получения экспериментальных данных о площадях озёр на территории исследований было использовано 190 безоблачных снимков Landsat-4, -5, -7, -8, полученных в тёплые месяцы (июль – август) в период 1985–2020 гг. На каждом ТУ определялось от нескольких десятков до нескольких сотен озёр, площади которых измерялись по космическим снимкам с использованием средств современной геоинформационной системы QGIS 3.

Для выделения озёр на спутниковом изображении применена бинарная классификация с использованием модифицированного нормализованного разностного водного индекса (*англ.* Modification of Normalised Difference Water Index — mNDWI), рассчитываемого по формуле:

$$mNDWI = 0,5 \left\{ \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)} + \frac{(Green - SWIR')}{(Green + SWIR')} \right\},$$

где Green (*англ.* зелёный) — 2-й канал Landsat-4, -5, -7 или 3-й канал Landsat-8; SWIR (*англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный) — 4-й канал Landsat-4, -5, -7 или 5-й канал Landsat-8; SWIR' — 5-й канал Landsat-4, -5, -7 или 6-й канал Landsat-8.

Для векторизации изображений озёр устанавливалось пороговое значение mNDWI = 0,1. Водные объекты, не относящиеся к термокарстовым озёрам, исключались с помощью векторной маски, учитывающей реки, поймы и др. Далее результаты автоматического дешифрирования проверялись и корректировались вручную с целью исключения ошибок (пропуск и ложные срабатывания). Для дальнейшего анализа формировались на каждом ТУ массивы данных о площади озёр в достаточно широком диапазоне их размеров. Минимальная площадь озёр составляла 0,45 га, что соответствует площади 5 пикселей на снимке, позволяющей достаточно надёжно выделять малые озёра на фоне «шумов» изображения. Максимальный размер озера составил 660,96 га.

По результатам измерения площадей озёр на каждом тестовом участке определялись средние (по территории каждого ТУ) значения, которые использовались для получения усреднённых (за каждый год по всем ТУ исследуемой территории) величин площадей озёр, далее называемых средними площадями озёр и обозначаемых \bar{S} .

Из-за большого числа пасмурных дней на исследуемой территории в некоторые годы отсутствовали безоблачные снимки. Поэтому полученные таким путём временные ряды величины \bar{S} оказались с пропущенными значениями в 1989, 1992, 1993, 2003–2005, 2008 и 2012 гг. Процедура восстановления пропущенных значений была проведена с использованием программных средств Python 3.9 и библиотеки машинного обучения sklearn (<https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.impute.IterativeImputer.html#sklearn.impute.IterativeImputer>), также реализованной с использованием языка программирования высокого уровня Python 3.9. Сформированный в итоге временной ряд средних площадей озёр \bar{S} приведён в *таблице*, где восстановленные значения \bar{S} отмечены звёздочкой.

Для проведения анализа климатических изменений на территории многолетней мерзлоты Таймыра использованы временные ряды среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы осадков, представленные в *таблице*. Временной ряд среднегодовой температуры за период исследования получен по результатам реанализа метеоданных (http://en.wikipedia.org/wiki/Meteorological_reanalysis), позволяющего получать метеорологическую информацию в заданных пунктах исследуемой территории. Временной ряд годовой суммы осадков образован по данным наблюдений метеостанции Хатанга, местоположение которой на территории

исследований показано на *рис. 1*. Для определения среднегодовой температуры воздуха на исследуемой территории в настоящей работе использовались данные системы реанализа ERA-5. Особенности использования процедур реанализа применительно к получению временного ряда температуры воздуха достаточно подробно изложены на примере территории Западной Сибири в работе (Полищук, Полищук, 2013).

Временные ряды данных о средних площадях озёр и климатических параметрах, полученные за период исследований на территории Таймырской Арктики

Год	\bar{S} , га	Среднегодовая температура, °С	Годовая сумма осадков, мм
1985	9,21	-12,60	271,00
1986	6,24	-12,57	247,70
1987	7,89	-15,09	272,70
1988	10,04	-11,86	343,40
1989	8,17*	-12,47	316,00
1990	6,78	-11,44	251,90
1991	9,67	-11,98	291,80
1992	8,14*	-12,40	244,30
1993	8,56*	-12,13	335,30
1994	9,26	-12,91	325,60
1995	6,69	-9,40	272,90
1996	6,08	-9,78	309,90
1997	5,95	-11,50	216,30
1998	7,42	-13,66	241,10
1999	7,97	-11,43	346,10
2000	10,74	-13,08	250,70
2001	9,30	-11,88	186,70
2002	15,95	-14,35	250,00
2003	9,17*	-11,47	285,30
2004	9,17*	-11,45	263,00
2005	9,10*	-11,45	224,10
2006	11,71	-12,34	320,40
2007	8,28	-10,46	329,00
2008	9,61*	-11,07	297,50
2009	8,83	-11,15	275,00
2010	12,40	-11,54	354,60
2011	5,60	-10,17	318,50
2012	9,64*	-10,93	219,00
2013	10,98	-11,43	165,70
2014	8,72	-11,53	321,40
2015	10,93	-11,38	365,10
2016	8,55	-9,49	234,50
2017	8,98	-10,28	299,30
2018	12,45	-10,89	336,20
2019	11,28	-10,32	273,00
2020	8,69	-6,82	286,22

* Восстановленные значения.

Для исследования взаимосвязи изменений климата и динамики площадей термокарстовых озёр Таймырской тундры в работе используется метод многомерного регрессионного анализа данных совместных исследований временных изменений площадей термокарстовых озёр, среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы осадков за 35-летний период исследования, представленных в *таблице* в виде трёхмерного массива данных (площадь озёр – температура – осадки). Результаты проведённого регрессионного анализа данных (см. *таблицу*) можно представить уравнением множественной линейной регрессии в виде:

$$\bar{S} = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3, \quad (1)$$

где c_i — регрессионные коэффициенты ($i = 0, \dots, 3$); x_1 — среднегодовая температура воздуха; x_2 — уровень осадков; x_3 — время (годы).

Результаты

На *рис. 2* приведены графики временного хода средней площади термокарстовых озёр и среднегодовой температуры на территории исследования, показывающие увеличение в среднем площадей озёр и температуры со временем. Временной ряд средних значений площади озёр был аппроксимирован линейным уравнением вида:

$$y = \alpha x + B, \quad (2)$$

где α — линейный коэффициент уравнения аппроксимации; B — свободный член уравнения аппроксимации; x — время (годы).

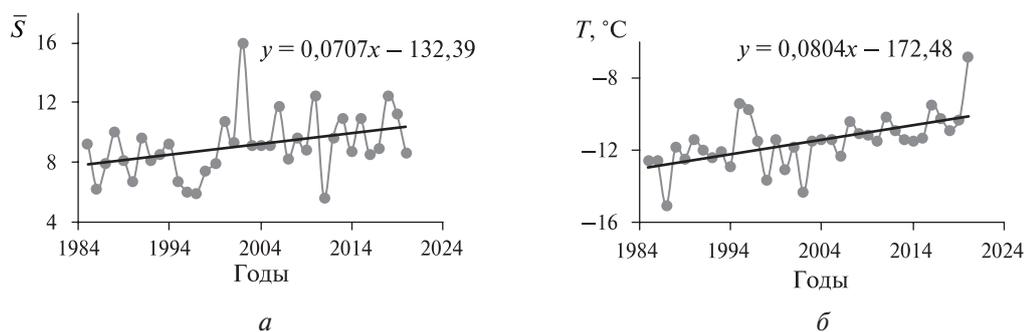


Рис. 2. Графики временного хода средней площади термокарстовых озёр Таймырской тундры (*а*) и среднегодовой температуры воздуха (*б*)

В общем случае положительный знак коэффициента линейного тренда α в уравнении (2) указывает, что исследуемый показатель в среднем увеличивается, а отрицательное значение коэффициента α демонстрирует уменьшение в среднем этого показателя в период наблюдений. В нашем случае имеет место увеличение в среднем во времени площади озёр с коэффициентом линейного тренда $\alpha = 0,0707$ га/год. Сплошная линия на графике *рис. 2а* представляет линейный тренд средней площади озёр с указанным выше значением коэффициента тренда.

График временного хода среднегодовых значений температуры воздуха (см. *рис. 2б*) демонстрирует рост во времени среднегодовой температуры как результат потепления климата в последние десятилетия. Показанные на графике точки представляют среднегодовые значения температуры. Сплошная линия на графике *рис. 2б* отображает линейную аппроксимацию (линейный тренд) графика временного хода температуры уравнением вида (2) с величиной коэффициента линейного тренда $\alpha = 0,0804$ °C/год.

Аналогичный анализ временного ряда годовой суммы осадков (см. *таблицу*) показал, что на территории Таймырской тундры наблюдается повышение в среднем уровня осадков со временем. Аппроксимация временного ряда этого показателя уравнением вида (2) позволила

установить линейный тренд изменения годовой суммы осадков с коэффициентом тренда $\alpha = 0,2309$ мм/год и величиной коэффициента $B = -180,64$. Сопоставление коэффициентов линейных трендов временных рядов температуры и уровня осадков показывает, что рост среднегодовой температуры воздуха на территории Таймырской тундры в последние десятилетия сопровождается увеличением в среднем годовой суммы осадков.

Проведён регрессионный анализ трёхмерного массива данных (см. *таблицу*) с помощью программных средств многомерного регрессионного анализа, реализованных на языке Python 3.9. В результате были получены следующие значения коэффициентов уравнения множественной регрессии (1) (с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,443$): $c_0 = -297,679$ га; $c_1 = -0,964$ га/°C; $c_2 = 0,005$ га/мм; $c_3 = 0,147$ га/год.

Известно, что величина коэффициентов регрессии в выражении (1) определяет относительный вклад соответствующей независимой переменной уравнения регрессии в изменения величины \bar{S} . Сравнивая значения коэффициентов регрессии c_1 и c_2 (для температуры и осадков соответственно), видим, что по абсолютной величине коэффициент c_1 почти в 200 раз превышает величину c_2 . Следовательно, можно принять, что влияние изменений среднегодовой температуры на величину средней площади термокарстовых озёр оказывается определяющим и значительно (на два порядка) превышает влияние уровня осадков на изменение площади озёр, т. е. влиянием осадков на изменение площадей термокарстовых озёр по данным за 35-летний период исследований на данной территории можно пренебречь по сравнению с воздействием среднегодовой температуры.

Заключение

На основе проведённого анализа данных можно сделать важный вывод, что установленная дистанционными исследованиями положительная динамика площадей озёр в зоне мерзлоты Таймырской тундры обусловлена повышением среднегодовой температуры, а влиянием изменения уровня осадков можно пренебречь. Обнаруженная закономерность может быть объяснена влиянием на многолетнемерзлые породы наблюдающегося в последние десятилетия потепления климата, ускоряющего термокарстовые процессы, сопровождаемые ростом в среднем площадей термокарстовых озёр криолитозоны Таймырской тундры.

Заметим, что в аналогичных исследованиях на территории Западной Сибири (Полищук, Полищук, 2013; Polishchuk, Polishchuk, 2014) была обнаружена другая тенденция — сокращение в среднем площадей озёр при потеплении климата. Различие тенденций в динамике площадей озёр в зонах мерзлоты на территориях Западной Сибири и Таймыра, по нашему мнению, может быть объяснено следующим образом. По данным работы (Полищук, Полищук, 2013), более 2/3 тестовых участков, на которых проводились исследования в Западной Сибири, располагались в подзонах прерывистой и островной мерзлоты, в которых термокарстовые процессы под влиянием потепления сопровождаются дренажом воды из малых озёр, приводящему, согласно исследованию (Полищук, Полищук, 2013), к сокращению суммарных площадей озёр. А вся исследуемая территория в Таймырской тундре располагается в зоне сплошной мерзлоты, где дренажные явления, вызывавшие сокращения площадей озёр в Западной Сибири, не проявлялись, что и привело к росту площадей озёр с повышением температуры на территории Таймырской Арктики.

Обнаруженная взаимосвязь между величиной средней площади термокарстовых озёр и климатическими параметрами на арктической территории может послужить основой для разработки модели прогнозирования динамики полей арктических озёр, ответственных за накопление метана в озёрах Таймырской тундры и его эмиссию в атмосферу.

Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета и при финансовой поддержке Администрации Томской области и Российского фонда фундаментальных исследований по проектам № 18-47-700001 и 19-07-00289.

Литература

1. *Кравцова В. И., Родионова Т. В.* Исследование динамики площади и количества термокарстовых озёр в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 1. С. 81–89.
2. *Полищук В. Ю., Полищук Ю. М.* Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озёр в зонах мерзлоты. Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013. 129 с.
3. *Полищук Ю. М., Богданов А. Н., Брыксина Н. А., Полищук В. Ю., Муратов И. Н., Куприянов М. А., Байсаямова О. А., Днепровская В. П.* Опыт и результаты дистанционного исследования озёр криолитозоны Западной Сибири по космическим снимкам различного разрешения за 50-летний период // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 42–55. DOI: 10/21046/2070-7401-2017-14-6-42-55.
4. Таймыр // Большая российская энциклопедия. 2017. URL: <https://bigenc.ru/geography/text/4179596> (дата обращения: 20.05.2021).
5. *Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N.* Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting // Intern. J. Environmental Studies. 2009. V. 66. No. 4. P. 423–431. DOI: 10.1080/00207230902758287.
6. *Luoto M., Seppala M.* Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland // Permafrost and Periglacial Processes. 2003. V. 14. P. 19–27. DOI: 10.1002/ppp.441.
7. *Polishchuk V. Yu., Polishchuk Yu. M.* Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6 // Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems / ed. O. Pokrovsky. N. Y.: Nova Science Publishers, 2014. P. 205–234. DOI: 10.978-94-007-4569-8.
8. *Polishchuk Y. M., Bryksina N. A., Polishchuk V. Y.* Remote analysis of changes in the number and distribution of small thermokarst lakes by sizes in Cryolithozone of Western Siberia, 2015 // Izvestia. Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. V. 51. No. 9. P. 999–1006. DOI: 10.1134/S0001433815090145.
9. *Riordan B., Verbyla D., McGuire A. D.* Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. Art. No. G04002. DOI: 10.1029/2005JG000150.

Analysis of interrelation of climatic change and dynamics of thermokarst lakes in the Arctic zone of Taymyr

V. Yu. Polishchuk^{1,2}, M. A. Kupriyanov³, Yu. M. Polishchuk³

¹ *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS
Tomsk 634055, Russia
E-mail: liquid_metal@mail.ru*

² *Tomsk Politechnical University, Tomsk 634004, Russia
E-mail: yupolishchuk@gmail.com*

³ *Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk 628011, Russia
E-mail: yupolishchuk@gmail.com*

The issues of analyzing the relationship between climate change and the dynamics of the areas of thermokarst lakes in the Taymyr Arctic over the past 35 years are considered. Using medium resolution satellite images of Landsat-4, -5, -7, -8 for the period 1985–2020 a time series of average values of the lake area was formed obtained by averaging the results of remote measurements of lake areas at 25 test sites located in the study area. On average, the analysis of the time series shows an increase in the size of lakes over the study period. The time series of the mean annual air temperature formed by the re-analysis method using the ERA-5 system shows, on average, an increase in temperature as a result of climate warming. The time series of annual precipitation amount was obtained for the period of study using data from a meteorological station located in the study area. On the basis of multivariate regression analysis of the obtained time series of lake areas and climatic parameters, a multiple regression equation was found which determines the relationship between the size of the lake area and changes in the average annual air temperature and annual precipitation. The equation showed that the greatest contribution to the increase in the size of lakes in the study area is made by an increase in temperature, and the effect of precipitation is negligible.

Keywords: satellite images, regression analysis, climatic changes, average annual temperature, precipitation level, reanalysis, permafrost, thermokarst lakes, Taymyr Arctic

Accepted: 23.08.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-193-200

References

1. Kravtsova V. I., Rodionova T. V., Investigation of the dynamics in area and number of thermokarst lakes in various regions of Russian cryolithozone, using satellite images, *Kriosfera Zemli*, 2016, Vol. 20, No. 1, pp. 81–89 (in Russian).
2. Polishchuk V. Yu., Polishchuk Yu. M., *Geoimitatsionnoe modelirovanie polei termokarstovykh ozer v zonakh merzloty* (Geo-simulation modeling of thermokarst lake fields in permafrost zones), Khanty-Mansiysk: UIP YuGU, 2013, 129 p. (in Russian).
3. Polishchuk Yu. M., Bogdanov A. N., Bryksina N. A., Polishchuk V. Yu., Muratov I. N., Kupriyanov M. A., Baisalyamova O. A., Dneprovskaya V. P., Experience and results of a remote study of lakes in the permafrost zone of Western Siberia from satellite images of various resolutions over a 50-year period, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 42–55 (in Russian), DOI: 10/21046/2070-7401-2017-14-6-42-55.
4. Taymyr, *Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya* (The Great Russian Encyclopedia), 2017, available at: <https://bigenc.ru/geography/text/4179596> (accessed: 29.03.2021) (in Russian).
5. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N., Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting, *Intern. J. Environmental Studies*, 2009, Vol. 66, No. 4, pp. 423–431, DOI: 10.1080/00207230902758287.
6. Luoto M., Seppala M., Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, Vol. 14, pp. 19–27, DOI: 10.1002/ppp.441.
7. Polishchuk V. Y., Polishchuk Y. M., Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6, In: *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems*, O. Pokrovsky (ed.), New York: Nova Science Publishers, 2014, pp. 205–234, DOI: 10.978-94-007-4569-8.
8. Polishchuk Y. M., Bryksina N. A., Polishchuk V. Y., Remote analysis of changes in the number and distribution of small thermokarst lakes by sizes in Cryolithozone of Western Siberia, 2015, *Izvestia. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, Vol. 51, No. 9, pp. 999–1006, DOI: 10.1134/S0001433815090145.
9. Riordan B., Verbyla D., McGuire A. D., Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images, *J. Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, Art. No. G04002, DOI: 10.1029/2005JG000150.