

УДК 528.8:551.34

Анализ взаимосвязи климатических изменений и термокарстовых процессов в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири

В.Ю. Полищук*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

Поступила в редакцию 26.05.2016 г.

Представлены результаты дистанционного исследования динамики площадей термокарстовых озер за 35-летний период, проведенного на 29 тестовых участках в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири, которые показали тенденцию сокращения площадей озер за указанный период. Проанализированы временные ряды климатических параметров (температуры и уровня осадков), полученные по данным реанализа. Установлено, что повышение среднегодовой температуры сопровождается сокращением площадей озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири.

Ключевые слова: вечная мерзлота, космические снимки, термокарстовые озера, климатические изменения, Западная Сибирь; permafrost, space images, thermokarst lakes, climate change, Western Siberia.

Введение

Известно, что большинство нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири располагаются в зоне вечной мерзлоты. В последние десятилетия в условиях потепления климата снижение прочности многолетнемерзлых пород приводит к росту аварийности на трубопроводах и других сооружениях нефтегазового комплекса, сопровождаемому большими экономическими и экологическими потерями [1, 2]. Кроме того, мерзлота, являясь хранилищем законсервированного углерода в обширных мерзлых торфяных болотах Сибири, Скандинавии и Северной Америки, при глобальном потеплении может стать источником еще большего потепления при высвобождении парниковых газов, особенно метана [3], так как повышение температуры будет приводить к дополнительному высвобождению метана как продукта жизнедеятельности микроорганизмов, перерабатывающих оттаявшее органическое вещество [4–6].

Прогнозируемое продолжение повышения температуры на земном шаре вызывает озабоченность как научного сообщества, так и правительств большинства стран мира. В частности, на конференции по климату, прошедшей в Париже в декабре 2015 — январе 2016 гг. с участием лидеров ведущих стран мира, обсуждались меры, направленные на недопущение в ближайшие десятилетия повышения глобальной температуры Земли более чем на 2°.

Основными источниками эмиссии метана в атмосферу на северных территориях являются болота и термокарстовые водоемы. По некоторым оценкам, значительная доля мирового объема природного метана сосредоточена в Западной Сибири, большую часть территории которой занимают своеобразные болотно-озерные ландшафты с бесчисленным множеством озер разных размеров и возраста. В связи с труднодоступностью территорий в зоне многолетней мерзлоты исследования таких ландшафтов невозможны без использования дистанционных методов. На данный момент накоплен большой опыт применения космических снимков в изучении различных природных систем и процессов [7–9], показавший эффективность таких методов.

Наиболее чувствительными к температурным изменениям на территории многолетней мерзлоты, согласно [10, 11], оказываются озерно-термокарстовые ландшафты. Для дистанционного изучения изменений термокарстовых процессов на территориях многолетней мерзлоты в качестве индикаторов геоэкологических изменений обычно используются термокарстовые озера, хорошо дешифрируемые на космических снимках [12, 13]. Как показано в [9, 14], таяние мерзлоты в условиях современного потепления климата приводит к ускорению термокарстовых процессов, что проявляется в изменении размеров и числа термокарстовых озер в зоне мерзлоты.

Исследования [7, 12, 14, 15], проведенные на территории Аляски, Скандинавии и Западной Сибири, выявили зависимость изменения термокарстовых процессов, в частности размеров озер, от климатических изменений. Однако некоторые ис-

* Владимир Юрьевич Полищук (vy_polishchuk@hotmail.com).

следователи динамики термокарстовых процессов в зоне мерзлоты (см., например, [13]) отрицают такую зависимость, возможно, вследствие недостаточной изученности взаимосвязи термокарстовых процессов с изменениями климата. Это не позволяет решать задачи обоснованного прогнозирования динамики термокарстовых процессов в условиях современных климатических изменений в зонах многолетней мерзлоты. На необходимость учета данной зависимости в задачах климатического прогноза на основе моделирования указывается в [16, 17]. В связи с этим цель работы – исследование взаимосвязи динамики термокарста и климатических изменений в зоне многолетней мерзлоты.

1. Экспериментальное изучение динамики площадей термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири

Наиболее чувствительным к изменению температуры показателем термокарстовых процессов является площадь термокарстовых озер, что иллюстрируется результатами дистанционных исследований в разных регионах мира, изложенных, например, в работах [7, 15, 18, 19]. Для получения данных о площадях термокарстовых озер на территории многолетней мерзлоты Западной Сибири была выбрана совокупность тестовых участков (ТУ) (рис. 1).

Тестовые участки выбирались приблизительно равномерно в каждой зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири. Как видно из рис. 1, в островной, прерывистой и сплошной зонах мерзлоты рас-

положено 7, 10 и 12 участков соответственно. Размеры тестовых участков выбирались примерно одинаковыми по площади (средняя площадь составляла 2600 км²).

Для каждого из тестовых участков было отобрано не менее 3–5 безоблачных снимков Landsat. Суммарная площадь исследованных участков составила около 78,5 тыс. км². Всего было собрано 106 снимков, полученных в теплые месяцы за период 1973–2009 гг. Для их обработки использовались программные средства современных геоинформационных систем ENVI 4.4 и ArcGIS 10.3.

На каждом ТУ определялось от нескольких сотен до нескольких тысяч озер, площади которых оценивались по космическому снимку с использованием средств геоинформационных систем. На основе полученных данных о площадях озер для всех ТУ были сформированы временные ряды средних значений площадей озер, которые аппроксимировались линейным уравнением вида

$$y = \alpha x + B, \quad (1)$$

где α – линейный коэффициент уравнения аппроксимации; B – свободный член уравнения аппроксимации; x – годы.

Для иллюстрации на рис. 2 приведен временной ход средней площади термокарстовых озер на ТУ-13, показывающий в среднем ее сокращение с коэффициентом линейного тренда $\alpha = -0,11$ га/год.

Положительный знак коэффициента линейного тренда α в уравнении (1) указывает, что площади озер за исследуемый период в среднем увеличиваются, а отрицательное значение коэффициента α показывает уменьшение в среднем этого показателя.

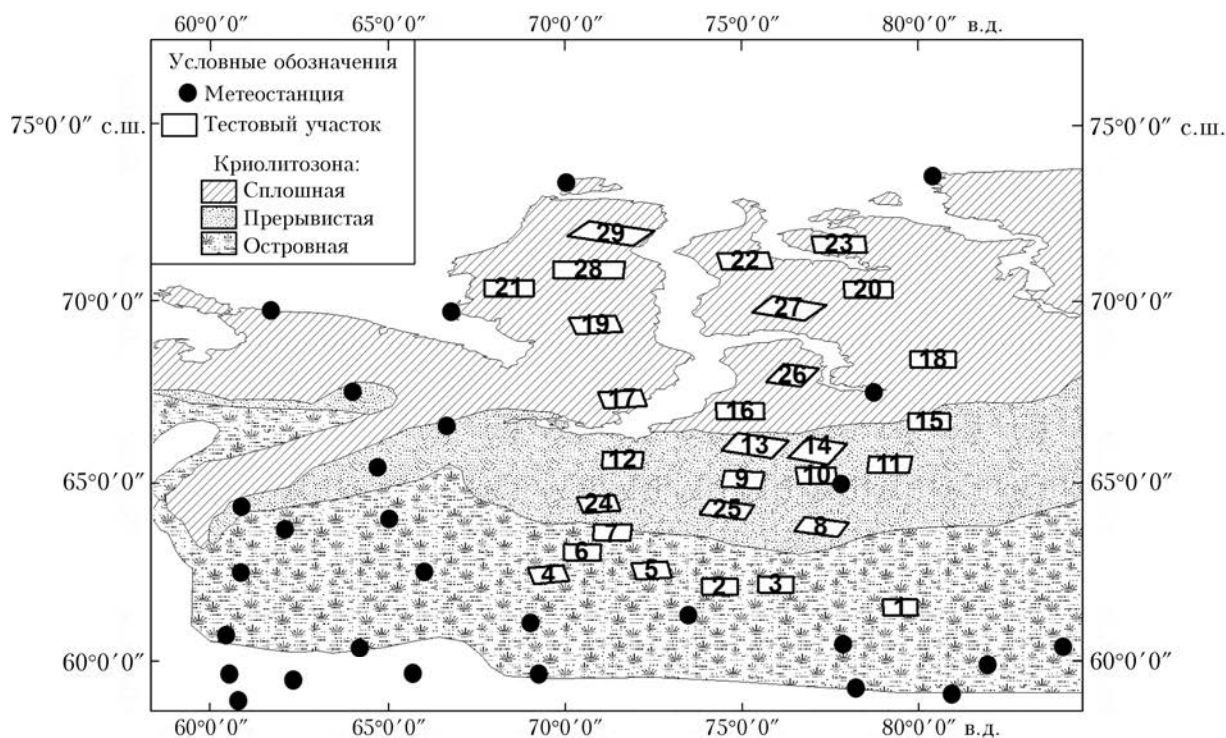


Рис. 1. Карта-схема расположения тестовых участков и сети метеостанций на исследуемой территории. Цифры на рисунке – номера участков зон

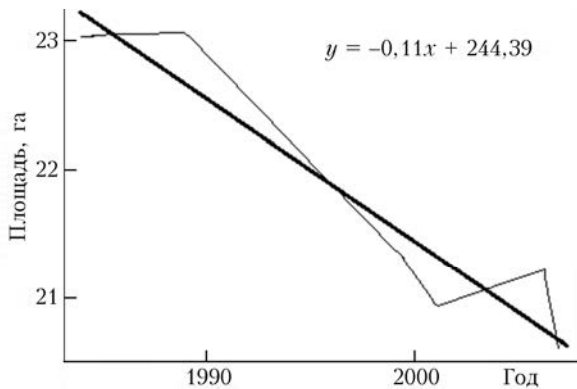


Рис. 2. Временной ход средней площади термокарстовых озер на ТУ-13

В табл. 1 приведены значения коэффициента α для временных рядов средних площадей термокарстовых озер на каждом тестовом участке в разных зонах распространения мерзлоты. Большинство значений α в табл. 1 отрицательны, что означает преобладание тенденции к сокращению в среднем площадей озер. Отметим, что только на трех ТУ (12, 19 и 28) величина α имеет небольшое положительное значение, что однако не нарушает общей тенденции.

Таблица 1

Коэффициент α линейного тренда изменений средних площадей термокарстовых озер

Тип зоны мерзлоты	Номер ТУ	Долгота, град.	Широта, град.	α , га/год	Среднее значение α , га/год
Островная	1	79,31	61,26	-0,15	-0,10
	2	74,23	62,03	-0,16	
	3	75,59	62,05	-0,03	
	4	69,35	62,25	-0,13	
	5	72,28	62,3	-0,15	
	6	70,27	63,01	-0,01	
	7	71,2	63,33	-0,14	
	8	77,13	63,4	-0,01	
Прерывистая	9	74,59	65,03	-0,04	-0,08
	10	77,03	65,1	-0,13	
	11	79,12	65,27	-0,09	
	12	71,37	65,35	0,01	
	13	75,23	65,6	-0,11	
	14	77,8	65,51	-0,05	
	15	80,15	66,41	-0,05	
	24	70,56	64,23	-0,19	
Сплошная	25	74,36	64,12	-0,06	-0,10
	16	74,54	66,57	-0,09	
	17	71,37	67,17	-0,05	
	18	80,23	68,23	-0,03	
	19	70,5	69,19	0,01	
	20	78,31	70,2	0,00	
	21	68,24	70,22	-0,03	
	22	75,04	71,08	-0,16	
	23	77,44	71,37	-0,28	
	26	76,26	67,58	-0,20	
	27	76,18	69,51	-0,18	
28	70,42	70,54	0,03		
29	71,18	71,55	-0,18		

Усредненное по всем ТУ значение коэффициента линейного тренда, полученное по данным табл. 1 и равное $-0,09$ га/год, показывает тенденцию к сокращению площадей озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири.

2. Исследование климатических изменений по данным реанализа

Анализ климатических изменений на территории многолетней мерзлоты Западной Сибири можно было провести с использованием временных рядов среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы осадков, полученных по данным наблюдений метеостанций в последние десятилетия на изучаемой территории. Однако для исследования взаимосвязи климатических и геокриологических изменений необходимо совпадение местоположения (или, по крайней мере, близкое расположение) метеостанций и тестовых участков.

Рассмотрим карту-схему расположения метеостанций на изучаемой территории, совмещенную со схемой расположения тестовых участков (см. рис. 1). Видно, что метеостанции и тестовые участки, как правило, не совпадают по местоположению. Только ТУ-2 и ТУ-10 находятся вблизи метеостанций. Такое несовпадение может явиться несомненной причиной значительных погрешностей в анализе указанной выше взаимосвязи климатических и геокриологических изменений. Действительно, на труднодоступных территориях в зоне многолетней мерзлоты метеостанции обычно располагаются по берегам рек или в населенных пунктах. Поэтому станции значительно удалены от тестовых участков. В связи с этим исследование, направленное на определение взаимосвязи изменений площадей термокарстовых озер и климатических показателей среднегодовой температуры воздуха и уровня осадков, потребовало получения данных о температуре и осадках с использованием методики реанализа климатических данных, позволяющей определять значения климатических показателей в местах расположения ТУ.

Реанализ (повторный метеорологический анализ) — это способ получения метеорологической информации в заданных пунктах исследуемой территории, основанный на процедуре «усвоения данных» [20]. Целью реанализа является «усвоение» ретроспективных данных наблюдений, накопленных за нескольких десятилетий в различных метеорологических архивах. Преимуществом данных реанализа является равномерное покрытие территории. Существуют различные проекты реанализа. В настоящей работе для определения климатических характеристик на исследуемой территории использовались данные проектов ERA-40, ERA-INTERIM и APHRODITE JMA.

Отметим особенности использования реанализа в нашей работе. С его помощью были получены среднемесячные значения температуры воздуха и годовых сумм осадков в местах расположения тестовых

участков для периода с 1970 по 2010 г. Так как данные реанализа представлялись в виде набора графических файлов в одном из распространенных графических форматов (*.png), то для извлечения из них необходимой климатической информации была создана карта-шаблон, представляющая собой расположение исследованных тестовых участков. С помощью графического редактора MS Paint она накладывалась на карту данных реанализа, и получалось новое изображение в виде совмещения карт расположения тестовых участков и полей температуры или уровня осадков.

В табл. 2 приведены данные о величине тренда среднегодовых значений температуры на каждом ТУ, что позволяет оценить пространственную изменчивость коэффициента линейного тренда на рассматриваемой территории. Сравнение средних значений α для каждой зоны мерзлоты показало, что в островной и прерывистой зонах наблюдается схожий темп повышения температуры воздуха, а в сплошной – более высокий темп.

Таблица 2

Коэффициент α линейного тренда среднегодовой температуры на разных ТУ

Тип зоны мерзлоты	Номер ТУ	Долгота, град.	Широта, град.	α , °С/год	Среднее значения α , °С/год
Островная	1	79,31	61,26	0,052	0,051
	2	74,23	62,03	0,057	
	3	75,59	62,05	0,061	
	4	69,35	62,25	0,039	
	5	72,28	62,3	0,057	
	6	70,27	63,01	0,052	
	7	71,2	63,33	0,053	
	8	77,13	63,4	0,04	
Прерывистая	9	74,59	65,03	0,066	0,054
	10	77,03	65,1	0,056	
	11	79,12	65,27	0,042	
	12	71,37	65,35	0,04	
	13	75,23	65,6	0,053	
	14	77,8	65,51	0,055	
	15	80,15	66,41	0,06	
	24	70,56	64,23	0,051	
Сплошная	25	74,36	64,12	0,051	0,063
	16	74,54	66,57	0,062	
	17	71,37	67,17	0,051	
	18	80,23	68,23	0,072	
	19	70,5	69,19	0,062	
	20	78,31	70,2	0,074	
	21	68,24	70,22	0,051	
	22	75,04	71,08	0,064	
	23	77,44	71,37	0,066	
	26	76,26	67,58	0,07	
	27	76,18	69,51	0,071	
28	70,42	70,54	0,066		
29	71,18	71,55	0,049		

На рис. 3 показан временной ход среднегодовых значений температуры воздуха, рассчитанный по данным реанализа ERA-40, который показывает рост среднегодовой температуры в результате потепления. Вершины ломаной линии представляют среднегодовые значения температуры, полученные усреднением среднемесячных значений температу-

ры. Сплошная прямая линия на рис. 3 отображает линейную аппроксимацию (линейный тренд) временного хода температуры уравнением вида (1) с коэффициентом $\alpha = 0,057$ °С/год, что соответствует результатам анализа реальных данных для Западной Сибири [21]. Как уже было сказано, положительный знак коэффициента α в уравнении (1) указывает на то, что анализируемый климатический показатель (в данном случае температура) в среднем увеличивается в исследуемый период.

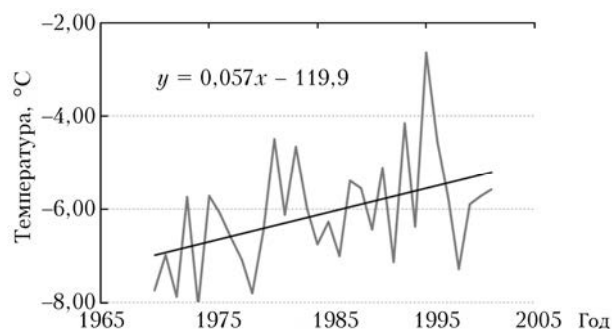


Рис. 3. Изменение среднегодовой температуры воздуха со временем

На рис. 4 приведен временной ход годовой суммы осадков, полученный по данным реанализа APHRODITE JMA, который показывает ее уменьшение со временем на территории многолетней мерзлоты Западной Сибири. Сплошная линия – линейная аппроксимация временного хода суммы осадков уравнением вида (1) с коэффициентом $\alpha = -3,434$ мм/год.

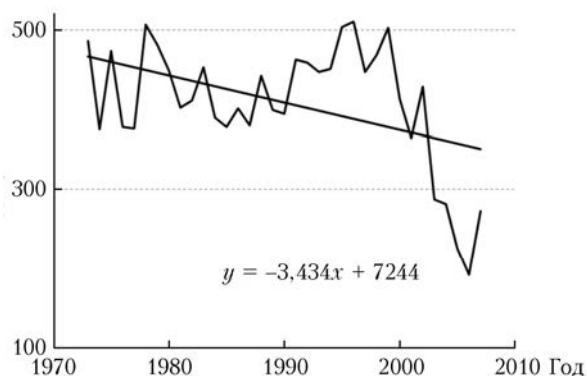


Рис. 4. Изменение годовой суммы осадков со временем

Сопоставление трендов временных ходов температуры и уровня осадков (см. рис. 3 и 4) показывает, что рост среднегодовой температуры воздуха на территории многолетней мерзлоты в Западной Сибири в последние десятилетия сопровождается снижением в среднем годовой суммы осадков. Заметим, что аналогичная связь уменьшения со временем уровня осадков и повышения среднегодовой температуры воздуха в последние десятилетия отмечается в зоне многолетней мерзлоты и в других регионах, например на Аляске [15] и в Восточной Сибири [22].

3. Анализ взаимосвязи климатических и геокриологических изменений в зоне многолетней мерзлоты

Изучение взаимосвязи изменений климата и динамики площадей термокарстовых озер на территории криолитозоны Западной Сибири проводится в работе на основе многофакторного регрессионного анализа данных совместных исследований временных изменений площадей термокарстовых озер, температуры воздуха и уровня осадков. По результатам исследования за более чем 30-летний период на 29 тестовых участках криолитозоны Западной Сибири, находящихся в разных ландшафтно-геокриологических условиях, как следует из выше изложенного, были составлены временные ряды усредненных по всем тестовым участкам значений годовых сумм осадков, среднегодовой температуры и средних площадей озер. Эти данные были объединены в 3-мерный массив данных (площадь озер – температура – осадки), зависящий от времени.

Дальнейший анализ полученного таким образом массива данных был проведен методом многомерного линейного регрессионного анализа, результаты которого можно представить уравнением множественной линейной регрессии

$$\bar{S} = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3, \quad (2)$$

где \bar{S} – усредненная по всем исследованным ТУ за определенный год площадь озер (зависимая переменная уравнения регрессии); c_i – регрессионные коэффициенты ($i = 0, \dots, 3$); x_1 – среднегодовая температура воздуха, x_2 – уровень осадков, x_3 – годы.

В результате регрессионного анализа многомерного массива данных, проведенного с помощью MSExcel, получены следующие значения коэффициентов уравнения регрессии (2):

$$c_0 = 315,15 \text{ га};$$

$$c_1 = -0,129 \text{ га}/^\circ\text{C};$$

$$c_2 = -0,013 \text{ га}/\text{мм};$$

$$c_3 = -0,145 \text{ га}/\text{год}.$$

Известно, что величина коэффициента регрессии в (2) 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 в 10 раз превышает величину c_2 . Следовательно, влияние изменений среднегодовой температуры на порядок превышает влияние изменений уровня осадков на величину средней площади термокарстовых озер.

Таким образом, можно сделать вывод, что установленное дистанционными исследованиями сокращение размеров озер в зоне многолетней мерзлоты определяется повышением среднегодовой температуры, а влиянием изменения уровня осадков

можно пренебречь. Обнаруженная закономерность может быть объяснена наблюдающимся в последние три–четыре десятилетия глобальным потеплением, ускоряющим термокарстовые процессы, что сопровождается сокращением в среднем площадей термокарстовых озер в зоне мерзлоты. Полученный нами вывод подтверждает предположения ряда исследователей (см., например, [15]), основанные на качественных соображениях о влиянии климатических изменений на уменьшение площадей термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 14-01-31489 и 15-45-00075).

1. Анисимов О., Лаэров С. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК РФ // Технологии ТЭК. 2004. № 3. С. 78–83.
2. Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов // Под ред. Е.С. Мельникова, С.Е. Гречищева. М.: ГЕОС, 2002. 402 с.
3. Кароль И.Л. Оценки характеристик относительного вклада парниковых газов в глобальное потепление климата // Метеорол. и гидрол. 1996. № 11. С. 5–12.
4. Walter K.M., Edwards M.E., Grosse G., Zimov S.A., Chapin F.S. Thermokarst lakes as a source of atmospheric CH_4 during the last deglaciation // Science. 2007. V. 318, iss. 5850. P. 633–636.
5. Краснов О.А., Maksutov S.S., Давыдов Д.К., Фофанов А.В., Глаголев М.В., Inoue G. Мониторинг эмиссии метана и двуокиси углерода из почвы в атмосферу и параметры почвы. Бакчарское болото Томской области // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 7. С. 644–654.
6. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., Dupre B. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia // Biogeosciences. 2011. V. 8, iss. 3. P. 565–583.
7. Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 4. С. 88–96.
8. Романов А.Н., Хвостов И.В., Павлов В.Е., Винокуров Ю.И. Дистанционный мониторинг заболоченных территорий Западной Сибири с использованием данных спутника SMOS // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 2. С. 150–153; Romanov A.N., Khvostov I.V., Pavlov V.E., Vinokurov Yu.I. Remote monitoring of wetland areas of Western Siberia using SMOS (ESA) data // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 4. P. 313–316.
9. 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 // Izv., Atmos. Ocean. Phys. 2015. V. 19, N 2. P. 100–105.
10. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
11. Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalen, Northern Sweden, especially 1960–1997 // Permafrost and Periglacial Processes. 2000. V. 11, N 1. P. 55–69.
12. Luoto M., Seppala M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland // Permafrost Periglacial Processes. 2003. V. 14, iss. 1. P. 19–27.

13. *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. 20, № 1. С. 81–89.
14. *Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N.* Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: Impacts of climatic warming on permafrost melting // Int. J. Environ. Stud. 2009. V. 66, N 4. P. 423–431.
15. *Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D.* Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950-2002 remotely sensed images // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. G04002. DOI: 10.1029/2005JG000150.
16. *Кабанов М.В., Лыкоsov В.Н.* Мониторинг и моделирование природно-климатических изменений в Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 9. С. 753–765.
17. *Мачульская Е.Е., Лыкоsov В.Н.* Моделирование термодинамической реакции вечной мерзлоты на сезонные и межгодовые вариации атмосферных параметров // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2002. Т. 38, № 1. С. 20–33.
18. *Брыксина Н.А., Полищук Ю.М., Курьянов М.А.* Сравнительный анализ изменений размеров озер в зоне мерзлоты Западной и Восточной Сибири по космическим снимкам // Геоинформатика. 2016. № 1. С. 64–67.
19. *Брыксина Н.А., Полищук В.Ю., Полищук Ю.М.* База данных по термокарстовым озерам Западной Сибири на основе космических снимков и возможности ее практического использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 3. С. 175–181.
20. *Meteorological reanalysis* [Электронный ресурс]. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Meteorological_reanalysis (дата обращения 25.03.2016)
21. *Шерстюков А.Б.* Изменения климата и их последствия в зоне мерзлоты России. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2009. 127 с.
22. *Железняк М.Н.* Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 2005. 227 с.

Y.M. Polishchuk. **The analysis of a correlation between climate change and thermokarst processes in the permafrost zone of Western Siberia.**

The remote sensing results of the dynamics of thermokarst lake areas are presented. The study is carried out for 29 test sites in the permafrost zone of Western Siberia and covers 35 years. It shows a trend toward a decrease in the areas of thermokarst lakes during the period under study. The time series of climatic variables (temperature and precipitation), received from reanalysis, are analyzed. It is found that an increase in the annual average temperature is accompanied by a reduction in the areas of thermokarst lakes located in the permafrost zone of Western Siberia.