

Ю.М. Полищук, Н.А. Брыксина, М.А. Куприянов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ РАЗМЕРОВ ОЗЕР В ЗОНЕ МЕРЗЛОТЫ ЗАПАДНОЙ И ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Введение

Наблюдающийся в последние десятилетия рост среднегодовой температуры земной поверхности приводит к деградации мерзлотных ландшафтов северных территорий Сибири, перспективных для хозяйственного освоения в ближайшие годы в связи с планами ускоренной добычи углеводородов и транспортировки их на восток, в Китай и другие страны Азиатско-Тихоокеанского региона. По оценке экспертов, потепление климата сопровождается ростом экономических и экологических ущербов предприятий российского нефтегазового комплекса, расположенных в зоне многолетней мерзлоты. Для снижения уровня ущербов необходимо проведение исследований динамики мерзлотных ландшафтов в условиях глобального потепления.

Наиболее чувствительными к температурным изменениям на территории многолетней мерзлоты, согласно [1, 2], оказываются термокарстовые озерные ландшафты. Для дистанционного изучения геоэкологических изменений на территориях многолетней мерзлоты по космическим снимкам в качестве индикаторов геоэкологических изменений обычно используются термокарстовые озера, хорошо дешифрируемые на космических изображениях [3, 4]. Как показано в [2, 5], таяние мерзлоты в условиях современного потепления климата приводит к ускорению термокарстовых процессов, что проявляется в изменении размеров термокарстовых озер в зоне мерзлоты.

Исследования, проведенные на территории Аляски и Западной Сибири, выявили существенную зависимость изменения площадей термокарстовых озер от геоэкологического и ландшафтного зонирования территории. Следует отметить, что в настоящее время наибольшее число исследований изменений площадей термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты относятся к подзоне прерывистого распространения мерзлоты. Согласно [5-7], исследованиями с использованием космических снимков Landsat установлено, что в подзоне

прерывистой мерзлоты площади озер в среднем за исследуемый период сокращаются.

Так как 2/3 территории криолитозоны Сибири занимает подзона сплошной мерзлоты, а в Восточной Сибири площадь сплошной мерзлоты вообще составляет 75% территории многолетней мерзлоты, наибольший интерес для исследования динамики термокарстовых процессов представляет наименее исследованная подзона сплошной мерзлоты Сибири. Предварительные результаты изучения изменения площадей озер в сплошной криолитозоне Восточной Сибири по космическим снимкам Landsat, представленные в нашей работе [8], основаны на исследованиях с использованием 14 тестовых участков (ТУ). Такое количество ТУ недостаточно для выявления особенностей изменения площадей озер в подзонах сплошной мерзлоты Западной и Восточной Сибири, последняя из которых в 13 раз превышает по площади территорию сплошной мерзлоты Западной Сибири. Поэтому в настоящей работе для проведения исследований термокарстовых процессов в подзоне сплошной мерзлоты Сибири с использованием космических снимков значительно увеличено число исследованных тестовых участков в Восточной Сибири.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы явилось дистанционное изучение изменений площадей термокарстовых озер в зоне мерзлоты Сибири в зависимости от географической широты и проведение сравнительного анализа полученных результатов для выявления особенностей изменения площадей озер в зоне сплошной мерзлоты Западной и Восточной Сибири.

Данные и объекты исследования

Исследование изменения размеров озер проводилось с использованием разновременных космических снимков Landsat, полученных за 40-летний период, начиная с 1973 г. Для проведения этих исследований было выбрано 53 тестовых участка (ТУ), из них в подзоне сплошной мерзлоты Западной Сибири

расположено 14 тестовых участков, а в Восточной Сибири – 39 участков. Размещение выбранных для исследований участков дано на рис. 1, где показана исследуемая территория подзоны сплошной мерзлоты в Западной и Восточной Сибири в соответствии с [9].

Тестовые участки выбирались в подзоне сплошного распространения мерзлоты (рис. 1) в местах наиболее активного термокарста, определяемых по большому скоплению термокарстовых озер, и с учетом наличия пар разновременных безоблачных снимков для каждого ТУ. Для обеспечения пространственной однородности свойств территории ТУ, в частности геокриологических свойств, размеры участков не должны быть большими. Общая характеристика совокупности выбранных тестовых участков дана в табл. 1, из которой видно, что размеры участков примерно одинаковы и сравнительно невелики.

Для проведения дистанционных исследований на каждый тестовый участок были подобраны

разновременные пары безоблачных снимков Landsat, полученных в летние месяцы периода 1973-2013 гг. Все снимки отобраны из общедоступного архива «Global Land Cover Facility», имеют географическую привязку в проекции UTM и относятся к уровню обработки 1Т, включающему радиометрическую и геометрическую коррекцию с использованием цифровых моделей рельефа. Общее количество снимков на территории исследования в Западной и Восточной Сибири составило 48.

Обработка космических изображений и определение площадей озер по спутниковым снимкам выполнены с использованием программных средств ENVI 4.7 и ArcGIS 10.3. Классификация озер на спутниковых снимках проводилась способом двоичного кодирования (алгоритм Binary encoding classification в программном обеспечении ENVI 4.7). На каждом тестовом участке средствами ArcGIS 10.3 были определены от нескольких сотен до нескольких тысяч термокарстовых озер.

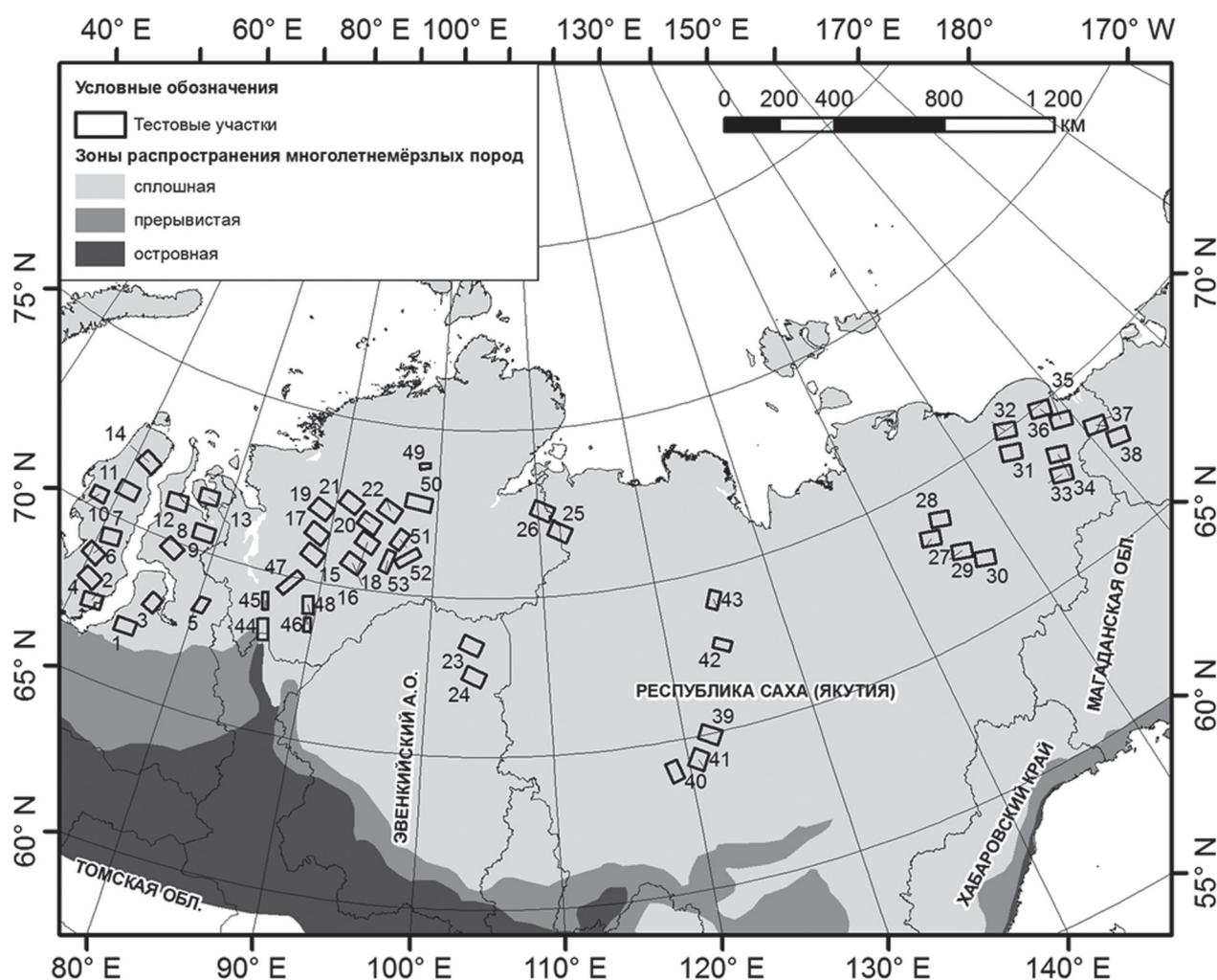


Рис. 1. Карта-схема расположения подзон многолетней мерзлоты на территории Восточной и Западной Сибири с обозначенными границами тестовых участков

Характеристика тестовых участков

Район исследования	Количество ТУ	Интервал изменений размеров ТУ, тыс. км ²	Средняя площадь ТУ, тыс. км ²
Западная Сибирь	14	2,2-4,1	3,506
Восточная Сибирь	39	0,7-4,6	3,507

Исследование изменений площадей термокарстовых озер за последние десятилетия

На основе полученных данных о площадях озер был проведен количественный анализ изменения площадей термокарстовых озер во времени. Для каждого тестового участка в подзонах сплошной мерзлоты Западной и Восточной Сибири были рассчитаны суммарные площади озер в разные годы наблюдений и определены абсолютные и относительные величины их изменения за период наблюдения (1973-2013 гг.). Величина относительного изменения суммарной площади определялась в соответствии с формулой:

$$R = (S_k - S_n) / S_n,$$

где S_k и S_n – суммарная площадь озер на тестовом участке в конечный и начальный годы исследования соответственно.

Положительные значения R показывают увеличение суммарной площади озер, а отрицательные значения этой величины – сокращение площади озер. Нулевое значение R , означающее отсутствие изменений площадей озер за период наблюдений, показывает уравнивание двух тенденций изменения площадей, а именно их роста и сокращения.

График относительного изменения суммарных площадей озер R в криолитозоне Восточной и Западной Сибири в зависимости от географической широты представлен на рис. 2. На нем точками показаны значения показателя R на каждом ТУ, а крестиком – их среднее значение по всем тестовым участкам на территории Восточной и Западной Сибири, равное 3,2% и –2,4% соответственно. Из рисунка следует, что в Восточной Сибири в среднем преобладает увеличение площади термокарстовых озер, а в Западной Сибири в среднем проявляется тенденция сокращения площадей термокарстовых озер. Черным и красным овалами показаны области разброса значений R для Восточной и Западной Сибири соответственно.

Как видно на рис. 2, в Западной Сибири на широтах более 70° с. ш. величина R на большинстве ТУ имеет положительные значения, что демонстрирует преобладающий рост суммарной площади озер, а на меньших широтах (менее 70° с. ш.) на большинстве

ТУ имеются отрицательные значения R , что показывает тенденцию сокращения площадей озер.

Следовательно, можно считать, что в подзоне сплошной мерзлоты Западной Сибири диапазон широт вблизи значений 70° с. ш. является областью перехода от тренда сокращения площадей термокарстовых озер к тренду их роста в среднем при увеличении географической широты. Ничего подобного в изменении площадей озер подзоны сплошной мерзлоты Восточной Сибири при изменениях географической широты не наблюдается. Действительно, как показывает график на рис. 2, как при больших, так и при малых значениях географической широты преобладают положительные величины R , что отображает тенденцию роста в среднем площадей озер на рассматриваемой территории. Выявление причин такого различия в тенденциях изменения размеров термокарстовых озер сплошной криолитозоны Западной и Восточной Сибири выходит за рамки настоящей публикации и требует проведения дополнительных комплексных исследований с привлечением данных наземных наблюдений.

Заключение

В статье представлены результаты дистанционных исследований слабо изученных до настоящего времени закономерностей изменения размеров термокарстовых озер в зависимости от географической широты на территории сплошной криолитозоны Западной и Восточной Сибири. Исследования проведены на 53 тестовых участках с использованием одновременных космических снимков Landsat, полученных в период 1973-2013 гг.

Проведенный анализ показал, что в Западной Сибири в среднем проявляется тенденция сокращения суммарной площади озер, при этом установлена следующая особенность широтной зависимости изменения площадей озер на этой территории: на широтах более 70° с. ш. преобладает рост суммарной площади озер, а на широтах менее 70° с. ш. отмечается тенденция сокращения площадей озер. Анализ полученных результатов дистанционных исследований показал, что в отличие от Западной Сибири на территории сплошной мерзлоты Восточной Сибири

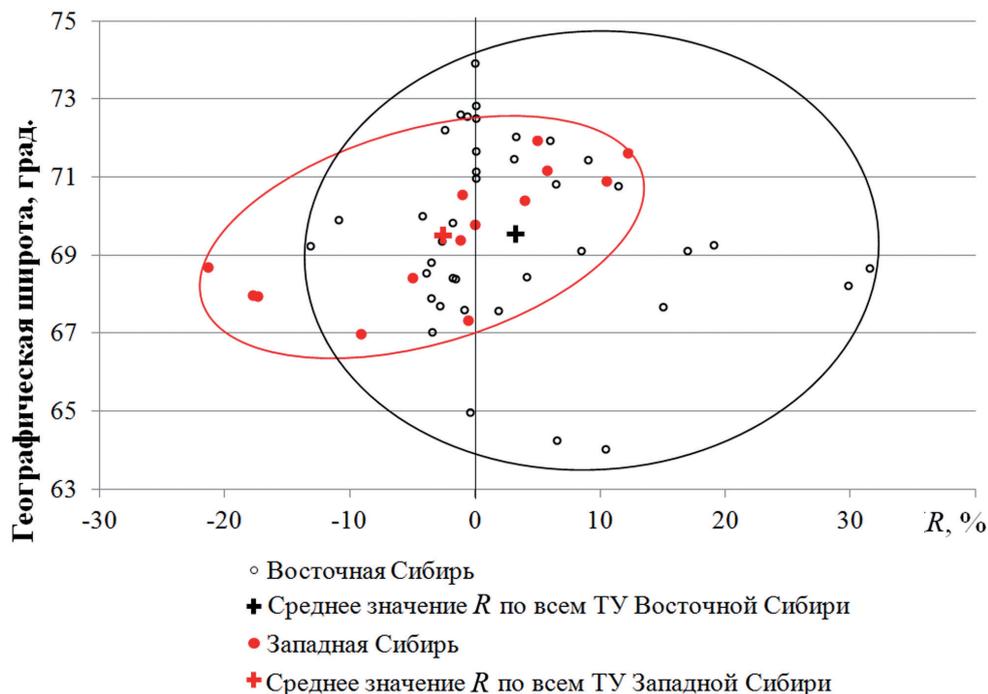


Рис. 2. Относительные величины изменения суммарной площади термокарстовых озер в зависимости от географической широты в Западной и Восточной Сибири

в среднем преобладает увеличение площади термокарстовых озер.

Работа выполнена в рамках проекта по договору с Минобрнауки РФ № 14.В25.31.0001 (БИО-GEO-CLIM) от 23.06.2013 г. и при поддержке грантов РФФИ по проектам № 15-45-00075 и № 15-35-50620.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, термокарстовые озера, глобальное потепление, разновременные космические снимки, ландшафтный анализ, Сибирь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. – М. : Наука, 2006. – 252 с.
2. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting // *International Journal of Environmental Studies*. – 2009. – Vol. 66. – No. 4. – P. 423-431.
3. Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменения размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // *Криосфера Земли*. – 2009. – Т. 13. – № 2. – С. 16-26.
4. Днепровская В.П., Полищук Ю.М. Геоинформационный анализ геоэкологических изменений в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири с использованием космических снимков // *Геоинформатика*. – 2008. – № 2. – С. 9-14.
5. Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // *Исследование Земли из космоса*. – 2009. – № 4. – С. 88-96.
6. Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950-2002 remotely sensed images // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111. – G04002, doi:10.1029/2005JG000150.
7. Polishchuk Yu, Kirpotin S., Bryksina N. Remote study of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Chapter 5 // *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems* / Edited by O. Pokrovsky. – NY: Nova Science Publishers. – 2014. – P. 173-204. DOI 10. 978-94-007-4569-8.
8. Полищук Ю.М., Куприянов М.А., Брыксина Н.А. Дистанционное изучение ландшафтных и широтных особенностей динамики озер криолитозоны Восточной Сибири // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2014. – Т. 11. – № 3. – С. 171-179.
9. Атлас СССР / отв. ред. Т.П. Сидоренкова. – М. : Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1984. – 260 с.
10. Ландшафтная карта СССР / под ред. И.С. Гудилина. – М. : Моск. госуд. университет, 1987. – URL: http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/data/landscapes/ (дата обращения 24.04.2015).