

## Сравнительный анализ динамики термокарста на территории мерзлоты Западной Сибири и Горного Алтая на основе космических снимков

Д.С. Шаронов<sup>1</sup>, Н.А. Брыксина<sup>2</sup>, В.Ю. Полищук<sup>3</sup>, Ю.М. Полищук<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Югорский государственный университет,  
628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16  
e-mail: D\_Sharonov@ugrasu.ru

<sup>2</sup> Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий  
информационных технологий (ЮНИИИТ)  
628011 г. Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151  
e-mail: pna@uriit.ru

<sup>3</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3  
e-mail: liquid\_metal@mail.ru

<sup>4</sup> Институт химии и нефти СО РАН  
634021, г. Томск, пр. Академический, 4  
e-mail: Yu\_Polishchuk@ugrasu.ru

Сравнительный анализ результатов дистанционных исследований площадей термокарстовых озер на территории вечной мерзлоты в горных долинах Алтая и на севере Западной Сибири в период 1973-2010 гг. позволил выявить разнонаправленные тенденции изменения площадей термокарстовых озер на исследуемых территориях. Показано, что на севере Западной Сибири преобладает тенденция сокращения в среднем площадей термокарстовых озер во времени, а в горных условиях наблюдается их увеличение. Анализ пространственной изменчивости формы береговых линий термокарстовых озер показал, что их форма на исследуемых территориях значительно отличается от окружности. Установлено, что степень извилистости примерно одинакова для двух территорий и практически не зависит от времени.

**Ключевые слова:** вечная мерзлота, термокарстовые озера, горные болота, космические снимки, глобальное потепление.

### Введение

Известно, что более 60% территории России располагается в зоне вечной мерзлоты, где находится большинство газовых и нефтяных месторождений страны. В последние три десятилетия в условиях глобального потепления климата на этих территориях наблюдается снижение прочности многолетнемерзлых пород, сопровождаемое ростом аварийности на трубопроводах и других объектах инфраструктуры (Анисимов, Лавров, 2004; Вечная мерзлота..., 2002). Для разработки мероприятий по снижению уровня аварийности необходимы экспериментальные исследования динамики термокарстовых процессов на рассматриваемой территории. Из-за высокой степени труднодоступности территории многолетней мерзлоты проведение этих исследований потребовало применение дистанционных методов.

Как показано в (Полищук, 2011) на основе анализа литературных источников по использованию данных дистанционного зондирования в геокриологических исследованиях, термокарстовые озёра, хорошо дешифрируемые на космических изображениях, являются наиболее пригодными индикаторами геокриогенных изменений многолетней мерзлоты в дистанционных исследованиях динамики термокарста, проводимых в последнее время как в России, так и за рубежом (Кравцова, Быстрова, 2009; Grosse et al., 2008; Smith et al., 2005). К настоящему времени выполнено достаточно много работ, связанных с исследованиями динамики термокарстовых озер на северных территориях Сибири. Однако работ, посвященных

этим исследованиям в горных долинах, явно недостаточно. В связи с этим целью настоящей работы явилось дистанционное исследование динамики термокарста в горных озерно-болотных комплексах и проведение сравнительного анализа полученных результатов с аналогичными результатами на территории многолетней мерзлоты севера Западной Сибири.

### Методика и данные

Для получения данных о площадях термокарстовых озер на территории вечной мерзлоты севера Западной Сибири было выбрано 30 тестовых участков (ТУ) и 6 участков на территории Горного Алтая. На рис. 1 и 2 приведены картосхемы расположения тестовых участков (ТУ) на исследуемых территориях.

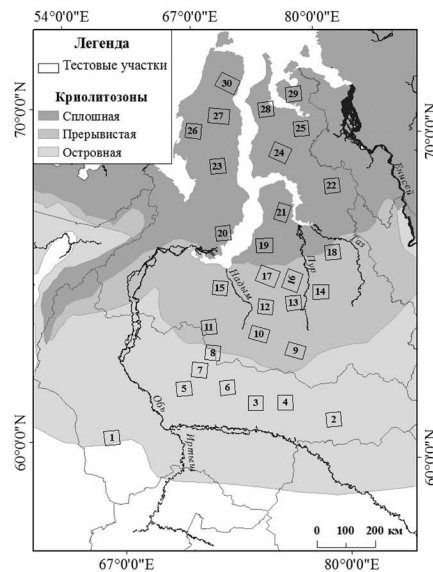


Рис. 1. Карта-схема расположения зон вечной мерзлоты на территории севера Западной Сибири с обозначенными границами тестовых участков

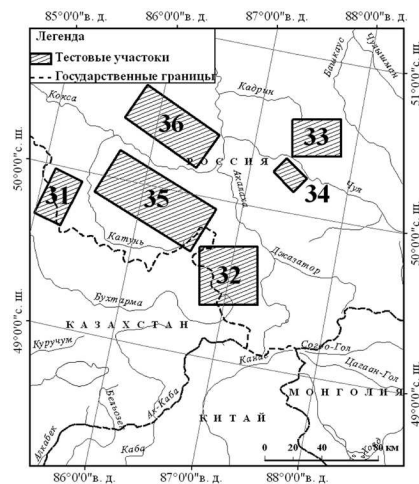


Рис. 2. Карта-схема расположения тестовых участков в Горном Алтае

Все шесть ТУ в Горном Алтае расположены в подзоне прерывистого распространения вечной мерзлоты. Участки на северной территории выбирались приблизительно равномерно в каждой подзоне многолетней мерзлоты: островная – 8, прерывистая – 10 и сплошная – 12 тестовых участков.

Для исследования динамики термокарстовых озер было отобрано 110 снимков Landsat, полученных в теплые месяцы 1973-2010 гг. Снимки были получены из архива Global Land Cover Facility. Все полученные снимки имеют уровень обработки 1Т («земная» коррекция), предполагающий проведение радиометрической и геометрической коррекций с использованием цифровых моделей рельефа.

Выбор космических снимков определялся отсутствием в пределах сцен облачного покрова. На каждый тестовый участок имелось по 3-6 безоблачных снимков Landsat. Для примера в таблице 1 приведен перечень разновременных снимков Landsat, подобранных для тестового участка ТУ-5.

Таблица 1. Перечень космических снимков Landsat для ТУ-5

| Космические снимки | Даты съемки |
|--------------------|-------------|
| Landsat-1 (MSS)    | 16.06.1973  |
| Landsat-5 (MSS)    | 04.09.1984  |
| Landsat-4 (TM)     | 26.06.1988  |
| Landsat-7 (ETM)    | 11.09.2001  |
| Landsat-7 (ETM)    | 19.05.2003  |
| Landsat-5 (TM)     | 19.08.2007  |

Дистанционные измерения площадей озер проводились по космическим снимкам с использованием стандартных средств геоинформационных систем ENVI 4.4, ERDAS Imagine 9.1 и ArcGis 9.3. Статистическая обработка полученных результатов выполнена с помощью программных систем Statistica 6.0 и Excel. На каждом тестовом участке определялось от нескольких сотен до нескольких тысяч термокарстовых озер различных размеров. Общее число исследованных термокарстовых озер составило более тридцати тысяч.

### Анализ динамики площадей термокарстовых озер

На основе полученных данных для каждого тестового участка построены графики временных зависимостей изменений суммарной площади термокарстовых озер от времени. Для иллюстрации на рис. 3 приведены графики временных ходов суммарной площади термокарстовых озер на отдельных ТУ, расположенных в разных подзонах мерзлоты.

Как видно из представленных на рис. 3 графиков, временные ходы суммарных площадей демонстрируют разнонаправленные тенденции (сокращение либо увеличение площади озер). Для проведения количественного анализа этих тенденций на каждом из тридцати шести тестовых участков были рассчитаны абсолютные и относительные величины изменения суммарных площадей за период наблюдения (1973-2010 гг.). Величина относительного изменения суммарной площади определялась в соответствии с формулой:

$$R = (\bar{S}_K - \bar{S}_H) / S_H ,$$

где  $S_K$  и  $S_H$  - суммарные площади озер на тестовом участке в конечный и начальный годы исследования соответственно.

Представленный на рис. 4 график зависимости величины R от географической широты местоположения ТУ на севере Западной Сибири иллюстрирует указанные выше различия тенденций в разных подзонах мерзлоты. Как видно из рис. 3, на всех ТУ в подзоне прерывистой мерзлоты  $R < 0$ . Следовательно, в этой подзоне проявляется тенденция сокращения суммарной

площади озер. Этот вывод подтверждается и данными других исследований (Riordan et al, 2006; Smith et al, 2005), проведенных в подзоне прерывистого распространения мерзлоты. В подзоне сплошной мерзлоты, как видно из рис. 4, наблюдаются два разнонаправленных процесса: севернее 70° с.ш. имеет место увеличение суммарной площади озер на 4-12 %, а южнее 70° с.ш. наблюдается сокращение площадей, как и в подзоне прерывистой мерзлоты. В подзоне островной мерзлоты величина R в среднем близка к нулю. Следовательно, в этой подзоне указанные выше тенденции достаточно явно не выражены.

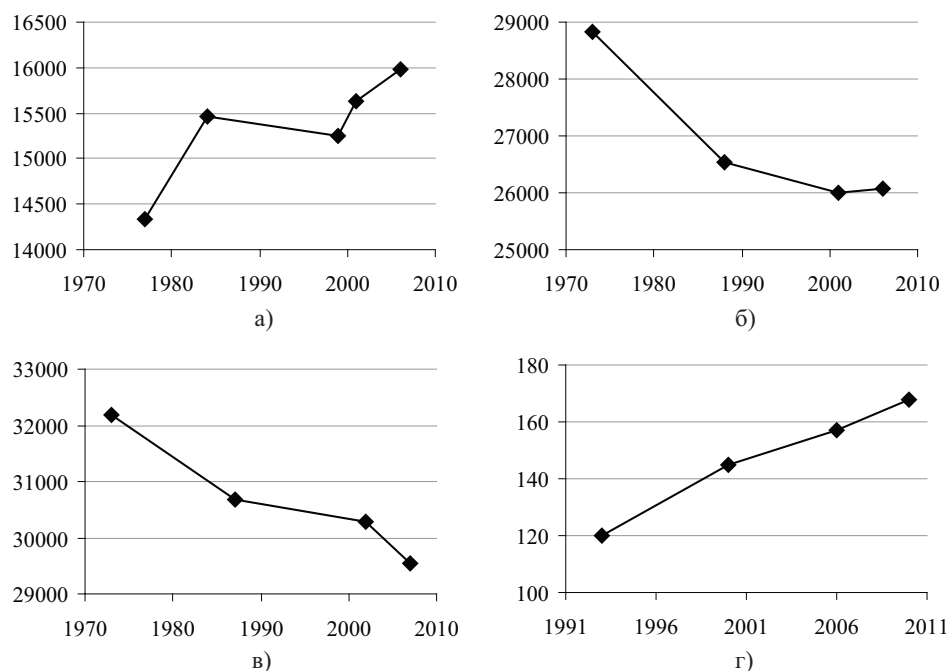


Рис. 3. Примеры временных ходов суммарной площади озер в разных подзонах мерзлоты: а) – сплошная, б) – прерывистая (север), в) – островная, г) – прерывистая (Горный Алтай)

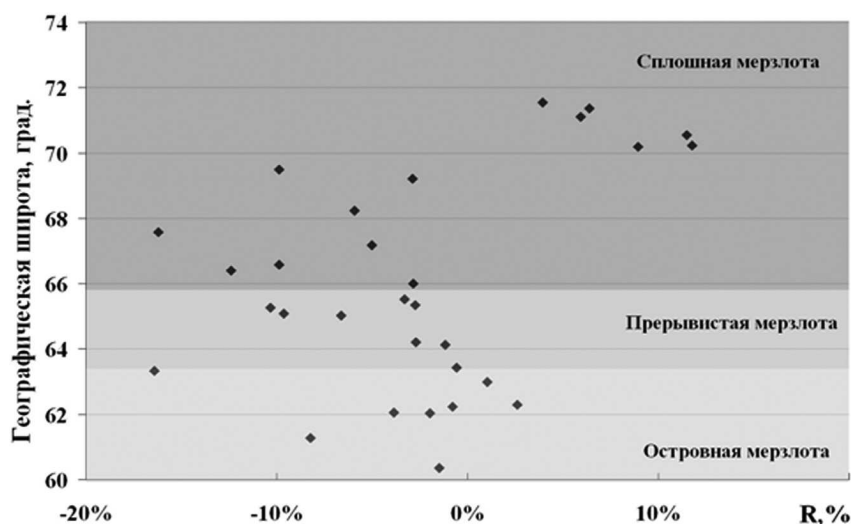


Рис. 4. Относительные величины изменения суммарной площади термокарстовых озер в зависимости от географической широты

Анализ временных ходов суммарных площадей ТО на территории Горного Алтая показывает, что на всех шести ТУ наблюдается увеличение суммарных площадей термокарстовых озер, как и в подзоне сплошной мерзлоты севернее 70 с.ш. (рис. 4). Величина R, ус-

редненная по всем ТУ на горных болотах, составляет 31%. Подобная тенденция увеличения площади горных озер отмечается в (Климатообусловленные геоморфологические опасности Горного Алтая. URL: <http://www.georiski.ru/testu1.htm>), где показано что в течении 50-ти летнего периода наблюдений имеет место устойчивое увеличение (на 50%) площадей ТО в пределах озерно-болотного комплекса Джангызколь, расположенного в непосредственной близости от территории наших исследований в Горном Алтае. Таким образом, как в горных долинах, так и в северной части сплошной мерзлоты (севернее 70° с.ш., рис. 4), наблюдается общая тенденция увеличения площади озер. Однако в горных долинах величина R, равная 31%, значительно превышает аналогичную величину для северной территории (4-12%), что может указывать на более высокую интенсивность термокарстовых процессов в горных условиях.

### Анализ изменчивости формы береговых границ термокарстовых озёр

**Проведено дистанционное изучение формы береговых границ термокарстовых озёр на исследуемых территориях.** Важность этих исследований определяется необходимостью совершенствования математической модели полей термокарстовых озер, используемой в задачах прогнозирования динамики термокарстовых процессов на территории многолетней мерзлоты в условиях климатических изменений (Полищук, 2011). Для оценки формы береговых границ термокарстовых озёр был использован показатель формы объекта (коэффициент  $f$ ), пропорциональный отношению квадрата периметра объекта ( $s^2$ ) к его площади ( $P$ ) (Берлянт и др., 2003):

$$f = \frac{s^2}{4\pi P} .$$

Исследование изменений показателя  $f$  было проведено на всех тестовых участках. Для каждого озера на исследованных ТУ был рассчитан коэффициент  $f$ , затем определялись его средние значения и доверительные интервалы для каждого ТУ. В табл. 2 для иллюстрации представлены статистические характеристики величины  $f$ , определенные для тестовых участков в Горном Алтае. Здесь доверительные интервалы рассчитаны для доверительной вероятности 0,9.

Таблица 2. Среднее значение показателя формы горных озер

| № ТУ | Среднее значение $f$ | Доверительный интервал |
|------|----------------------|------------------------|
| 1    | 2,81                 | 2,48 – 3,13            |
| 2    | 3,00                 | 2,83-3,17              |
| 3    | 3,57                 | 2,93-4,21              |
| 4    | 2,11                 | 1,89-2,34              |
| 5    | 2,60                 | 2,35-2,85              |
| 6    | 2,47                 | 2,27 – 2,67            |

На рис. 5 представлен график временных изменений среднего значения коэффициента  $f$ , вычисленного по данным измерений на всех тестовых участках в Горном Алтае. Точки на графике отображают значения  $f$ , полученные усреднением средних значений на всех ТУ.

Из рис. 5 видно, что показатель пространственной изменчивости формы береговых линий горных озер практически не зависит от времени. Среднее значение  $f$  горных озер составляет 2,8.

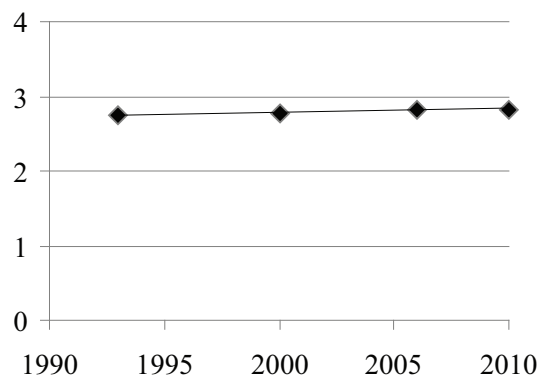


Рис. 5. Изменение среднего значения  $f$  во времени на Горном Алтае

Рассмотрим результаты аналогичных исследований изменчивости формы береговых границ озер на севере Западной Сибири. График временной зависимости усредненных (по всем ТУ) значений коэффициента  $f$  на этой территории приведен на рис. 6, из которого видно, что величина  $f$  так же, как и в горных долинах не зависит от времени. Среднее значение показателя  $f$  на этой территории равно 3,1.

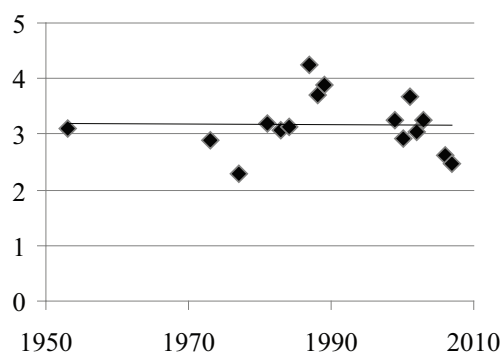


Рис. 6. Изменение среднего значения  $f$  во времени на севере Западной Сибири

Дадим объяснения полученных результатов. Среднее значение  $f$  для озер в горах и на севере Западной Сибири приблизительно одинаковы (2,8 и 3,1 соответственно), что можно интерпретировать как относительную схожесть формы береговых границ термокарстовых озер на двух исследуемых территориях. При этом указанные выше значения показателя  $f$  значительно превышают его величину для окружности ( $f=1$ ). Следовательно, термокарстовые озера на исследуемых территориях характеризуются значительной извилистостью береговых границ.

Результаты работы могут быть использованы в задачах моделирования полей термокарстовых озер и прогноза динамики исследования термокарста на территориях многолетней мерзлоты в условиях климатических изменений.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 14.740.11.0409 от 20 сентября 2010 г.) и АВЦП Минобрнауки РФ (проект «Изучение термокарста в зонах многолетней мерзлоты Западной Сибири под воздействием глобального потепления с использованием геоимитационного моделирования и дистанционного зондирования»).

## Литература

1. Анисимов О., Лавров С. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК РФ // Технологии ТЭК. 2004. № 3. С. 78 - 83.
2. Берлянт А.М., Востокова А.В., Кравцова В.И. Картоведение. М.: изд-во МГУ, 2003. 477 с.
3. Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов / Под ред. Е.С. Мельникова, С.Е. Гречищева. М.: ГЕОС, 2002. 402 с.
4. Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изучение динамики термокарстовых озер России // Геинформатика, 2009. № 1. С. 44-51.
5. Полищук В.Ю. Математическое моделирование динамики термокарстовых процессов на территории многолетней мерзлоты Западной Сибири: Дис. канд. техн. наук: 05.13.18. Барнаул, 211. 155 с.
6. Grosse G., Romanovsky V., Walter K., Morgenstern A., Lantuit H., and Zimov S. Distribution of Thermokarst Lakes and Pounds at Three Yedoma Sites in Siberia // Proceedings of the 9th Intern. Conf on Permafrost, Fairbanks, Alaska, June 29- July 3, 2008. pp. 551-556.
7. Riordan B., Verbyla D., and 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.
8. Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., and Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes // Science, 2005. Vol. 308. № 3. pp. 14.

## Comparative analysis of thermokarst dynamics in permafrost territory of Western Siberia and Gorny Altai on the basis of space images

D.S. Sharonov<sup>1</sup>, N.A. Bryksina<sup>2</sup>, V.Y. Polishchuk<sup>3</sup>, Y.M. Polishchuk<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Ugra State University

16 Chekhova Str., Khanty-Mansiysk, 628012, Russia

e-mail: D\_Sharonov@ugrasu.ru

<sup>2</sup> Ugra Research Institute of Information Technologies (URIIT)

151 Mira Str., Khanty-Mansiysk, 628011, Russia

e-mail: pna@uriit.ru

<sup>3</sup> Institute of monitoring of climatic and ecological systems, Siberian Branch of RAS

10/3 Academichesky Ave., Tomsk, 634021, Russia

e-mail: liquid\_metal@mail.ru

<sup>4</sup> Institute of Petroleum Chemistry Siberian Branch of RAS

4 Academichesky Ave., Tomsk, 634021, Russia

e-mail: Yu\_Polishchuk@ugrasu.ru

Comparative analysis of remote sensing studies of thermokarst lakes areas in the permafrost in the Altai mountain valleys and in the north of Western Siberia in the period 1973-2010 yrs permit to reveal multidirectional trends of thermokarst lakes areas in the study territories. It is shown that tendency of reducing in time for the average area of thermokarst lakes prevails in the north of Western Siberia and increasing their area on average are revealed in the mountains. The analysis of the spatial variability of the shape of thermokarst lakes shorelines showed that the shape of these lines in the study territories is significantly differs from the circle. The degree of spatial variability is approximately equal for the two territories and is not practically time dependent.

**Keywords:** permafrost, thermokarst lakes, mountain swamps, space images, global warming.