

Геокриологические факторы активизации термокарстовых процессов в Центральной Якутии

Н.В. Нестерова^{1,2*}, О.М. Макарьева^{1,3}, А.Н. Федоров³, А.Н. Шихов⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

²Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург

³Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

⁴Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

*nnesterova1994@gmail.com

Аннотация. Использование снимков Landsat в бассейнах рек Центральной Якутии за период 2000–2019 гг. позволило выявить увеличение площади термокарстовых озер в два раза для бассейнов рек Суола и Таатта и на четверть в бассейне реки Танда. Скачкообразное увеличение площади озер обусловлено краткосрочными периодами аномального повышения температуры деятельного слоя почвогрунтов, которые, в свою очередь, вызваны высокими величинами запасов снежного покрова и общего годового количества осадков. Повышенная влажность почвы и отепляющий эффект снежного покрова привели к снижению интенсивности промерзания почвы и повышению температуры верхнего слоя почвогрунтов. Сочетание этих факторов стало условием активизации термокарстовых процессов, приведших к резкому увеличению площади озер в 2007–2008 годах.

Ключевые слова: термокарстовые озера, снимки Landsat, Центральная Якутия, температура и влажность деятельного слоя, жидкие осадки и снежный покров, Спасская Падь.

Reasons of activation of thermokarst processes in Central Yakutia

N.V. Nesterova^{1,2*}, O.M. Makarieva^{1,3}, A.N. Fedorov³, A.N. Shikhov⁴

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

²State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

³Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

⁴Perm State University, Perm, Russia

*nnesterova1994@gmail.com

Abstract. Increase of thermokarst lakes area by two times for the Suola and Taatta River basins and a quarter times in the Tanda River basin is revealed based on the use of Landsat images in Central Yakutia for the period 2000–2019. The abrupt increase of lakes area is due to short-term periods of abnormal rise of soil temperature and deepening of active layer, which are caused by high values of snow water equivalent and total annual precipitation leading to increased soil moisture and decreased soil freezing intensity. The combination of these factors triggered the activation of thermokarst processes, which led to a sharp, in average more than 1.5 times, increase of thermokarst lakes area in 2007–2008.

Keywords: thermokarst lake, Landsat, Central Yakutia, moisture content and temperature of active layer, rain precipitation and snow cover, Spasskaya Pad'.

Введение

Наиболее распространенными среди озер Центральной Якутии (ЦЯ) являются термокарстовые озера, которые занимают 80 % от общего числа озер Якутии [4].

В условиях климатических изменений наблюдается разнонаправленная динамика количества и площади термокарстовых озер в различных регионах России [2]. Для территории Центральной Якутии выявлен рост общей площади и количества термокарстовых озер, составивший для разных участков от двух- до трехкратного за период 1980-2009 гг. [3; 5]. Однако, авторы работ подчеркивают, что изменения носят циклический характер, следуя чередованиям многоводных и маловодных лет.

Целью данной работы является исследование условий, приводящих к нелинейной динамике развития термокарстовых озер в ЦЯ, на основе анализа данных дистанционного зондирования и детальных наблюдений за состоянием деятельного слоя почвогрунтов. При прогнозируемых значительных изменениях климата территории Центральной Якутии задача понимания условий, способствующих активизации термокарстовых процессов, является крайне актуальной.

Природные условия района исследования, материалы и методы исследования

Природные условия. Территория исследования относится к юго-восточной части Центрально-Якутской низменности со средней абсолютной высотой территории 250 м. Климат региона резко континентальный. За период 1966-2018 гг. среднегодовая температура воздуха на метеостанции Якутск составила -8,8 °С. Среднегодовое количество осадков составляет 237 мм, их основное количество (75-85 %) выпадает в летний период [1].

Центральная Якутия относится к области сплошного распространения многолетнемерзлых пород со средней мощностью 300 м. Преобладающий ландшафт территории – травянисто-брусничный лиственничник на мерзлотно-таежных полевых и оподзоленных почвах. Одной из основных черт региона является слабое развитие речной сети и широкое распространение эрозионно-термокарстовых котловин [1]. Наиболее зрелые термокарстовые формы, аласы, покрыты лугостепной растительностью с засоленными почвами.

Данные дистанционного зондирования. В настоящей работе для определения площади термокарстовых озер ЦЯ были получены 54 снимка со спутников Landsat (сенсоров TM, ETM+, OLI) за период с 2000 по 2019 г. Рассматривались снимки летнего сезона (с июня по сентябрь) и сравнительно крупные озера площадью более 1 га. Методика выделения озер включала следующие этапы: 1) пересчет значений яркости в спектральных каналах из исходных значений в отражательную способность и атмосферная коррекция методом DOS, с помощью модуля Qgis semi-automated image classifier (SCP); 2) выделение водной поверхности по пороговому значению нормализованного разностного водного индекса NDWI (порог принят равным 0,3); 3) конвертация в векторный формат данных, расчет площадей, удаление объектов площадью менее 1 га.

В качестве района исследования приняты бассейны трех рек с площадями от 1270 до 8290 км², характеризующиеся значительным распространением аласов (Рис. 1, Табл. 1). Доля площади аласов, оцененная на основе работ [6], изменяется от 4,9 % в пределах водосбора р. Танда до 9,7 % на водосборе р. Суола – с. Бедеме.

Табл. 1 Распределение аласов и термокарстовых озер в бассейнах рек.

Код поста	Название бассейна	Площадь водосбора, км ²	Площадь аласов, км ² /%	Площадь озер, 09.06.2019, км ² / %	Количество снимков	Минимальная площадь озер, км ² / год	Максимальная площадь озер, км ² / год
3217	р. Суола – пос. Бютейдях	1270	81.7/6.4	17.85/1.41	58	8.89/2003	19.4 / 2018
3306	р. Танда – с. Бярия	2000	97.9/4.9	27.67/1.38	11	23.4, 2001	29.4 / 2018
3628	р. Таатга – с. Уолба	8290	776/9.4	213.28/2.57	7	118, 2001	225 / 2018
3659	р. Суола – с. Бедеме	3380	326/9.7	66.05/1.95	27	34.0, 2004	70.8 / 2008

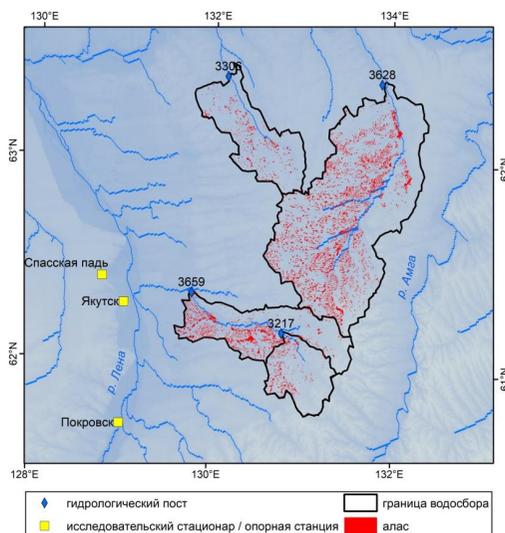


Рис. 1 Объект исследования.

Данные наземных наблюдений. Для оценки связи характеристик деятельного слоя и снежного покрова с динамикой развития термокарстовых озер использовались материалы наблюдений на научно-исследовательском стационаре Спасская Падь. Они включали суточные данные наблюдений за влажностью почвы на глубинах 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 м и температурой до глубины 1.2 м за период 1998 – 2010 гг. [8; 7], а также данные наблюдений за влажностью (до 1.5 м) и температурой почвы (до 3.2 м), которые отбирались 1-2 раза в месяц за период 1998 – 2018 гг. (данные предоставлены А.Н. Федоровым, Институт мерзлотоведения СО РАН). В работе были использованы данные площадок, представляющих плоскоравнинное межальское с коренным лиственничником. В работе [8] показано, что данные стационара Спасская Падь являются репрезентативными для типичных ландшафтных условий ЦЯ. Для анализа также

использованы данные наблюдений за снежным покровом и температурой почвы на глубине 1.6 м на метеорологической станции Якутск.

Результаты

В пределах трех из четырех рассматриваемых бассейнов в период 2000-2019 гг. площадь термокарстовых озер увеличилась в два раза. На Рис. 2 представлен график изменения площади озер в бассейне р. Суола – пос. Бютейдах в период 2000-2019 гг. с наибольшим количеством доступных снимков без облачности (с пропусками в 2007 и 2012 гг.). Максимальное развитие озер характерно для 2008 и 2018 гг., минимальное – для периода 2001-2004 гг. По данным [3; 8] наибольшее затопление аласов в ЦЯ наблюдалось в 2007 году, мы предполагаем, что площадь озер в исследуемых бассейнах в 2007 г. была не ниже, чем в 2008 г.

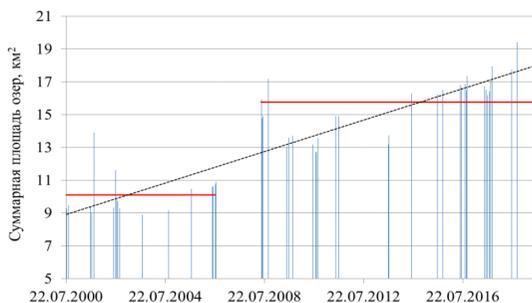


Рис. 2 Тренд изменения площади термокарстовых озер на водосборе р. Суола–пос. Бютейдах за период 2000 – 2019 гг.; красная линия соответствует средней площади озер за два периода 2000-2006 и 2008-2019 гг.

Важно отметить, что несмотря на наличие общей линейной тенденции увеличения площади озер, изменения происходят скачкообразно. Так в 2007 году произошло резкое увеличение площади озер, определяющее ее динамику в последующие годы (Рис. 2). В течение 2000-2006 гг. средняя площадь озер в бассейне р. Суола – пос. Бютейдах составила 10,0 км², а в 2008-2019 гг. – 15,8 км².

Резкому увеличению площади озер в 2007-2008 гг. предшествовал период (2005-2008 гг.) с аномально снежными зимами и общим годовым количеством осадков выше нормы на 20-43 %. При среднем значении запасов воды в снежном покрове к началу снеготаяния на станции Якутск (1966-2018 гг.) 59 мм в 2005-2007 гг. эта величина составила 88, 86 и 78 мм (превышение нормы на 50, 46 и 32 %). Среднее годовое количество осадков за период 2005-2008 гг. составило 303 мм (при норме 237 мм). Однако прямой функциональной связи между площадью термокарстовых озер и количеством твердых или общих осадков не наблюдается.

В работе [8] подробно рассмотрены геокриологические последствия выпадения значительных сумм осадков в рассматриваемый период. Аномально высокие запасы воды в снежном покрове и выпадение жидких осадков в предзимний период обусловили продолжительный период повышенной влажности почвогрунтов в ЦЯ. Так в 2006 году средняя величина влажности верхнего 80-сантиметрового слоя почвы за теплый период (май – сентябрь) составила 24 % от сухого веса по сравнению с 11 % в 2003 году. 1 октября 2006 года (перед началом промерзания почвы) влажность верхнего 10-сантиметрового слоя составила 50 %, а 80-сантиметрового слоя 46 %, то есть к началу снеготаяния 2007 года почва находилась в состоянии полного влагонасыщения. Были построены зависимости максимальной площади термокарстовых озер в бассейне р.

Суола – пос. Бютейдах от средней за теплый период и максимальной суточной влажности верхнего 1-метрового слоя почвы в предыдущий год за период 2000-2019 гг. Коэффициент корреляции составил 0.63 и 0.80 соответственно. Очевидно, что данные зависимости имеют качественный характер, так как могут быть построены только за непродолжительный период времени, характеризующийся резким изменением рассматриваемых величин. В будущем в засушливые годы, когда влажность почвы будет минимальной, площадь озер скорее всего не снизится до уровня 2000-х гг.

В результате совместного действия двух взаимосвязанных факторов – значительной влажности почвы и аномально высоких запасов воды в снежном покрове произошло изменение теплового режима почвогрунтов. Повышение влажности почвы в 2005 году, обусловленное высоким запасом воды в снежном покрове зимой и значительными осадками летом, а также высота снега в следующий зимний сезон препятствовали промерзанию почвогрунтов, результатом чего явилась повышенная температура почвы на глубине 1.2 м. Минимальная и максимальная температура на глубине 1.2 м на площадке Спасской Пади в 2004 году составила -10.4 °C и 0.0 °C, а в 2007 году -3.1 °C и +2.2 °C. Максимальная глубина протаивания до 2004 года изменялась от 1.37 до 1.57 см, а в 2007 году она составила 1.67 см [8].

Авторами построен график хода максимальной площади термокарстовых озер и максимальной температуры почвы на глубине 1.6 м на станции Якутск (Рис. 3). Коэффициент линейной корреляции между величинами со сдвигом в 1 год составляет 0.39, однако на Рис. 3 хорошо видно, что направленность изменений площади озер повторяет тенденции хода температуры почвы с запазданием в 1 год. За ростом температуры почвы от 1.9 до 7.5 °C в 2004-2006 гг. следует резкое увеличение площади озер с 8.9 до 17.2 км² в 2007-2008 гг. Аналогичная ситуация наблюдается в 2000-2001 гг.: резкое повышение максимальной температуры почвы с 4.3 до 6.9 °C в 2000 году сопровождается скачком величины площади озер с 9.5 до 13.9 км².

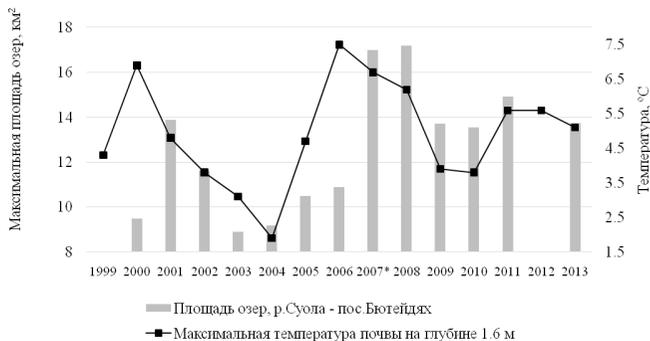


Рис. 3 Ход максимальной площади термокарстовых озер и максимальной температуры почвы на глубине 1.6 м на станции Якутск; *при условии, что площадь озер в 2007 г. не ниже величины 2008 г.

Выводы

На основе снимков Landsat выявлена тенденция увеличения площади термокарстовых озер в бассейнах рек восточной части Центральной Якутии Суола, Танда и Таатга за период 2000-2019 гг. В бассейнах рек Суола и Таатга площадь озер за период 20 лет увеличилась в два раза. А в бассейне р. Танда на 25%. Установлено, что несмотря на наличие общего линейного тренда на повышение площади озер, увеличение площади озер происходит скачкообразно.

Выявлена зависимость между состоянием деятельного слоя многолетнемерзлых пород и подстилающей поверхности и резким увеличением площади термокарстовых озер в ЦЯ. Период 2005-2008 гг. характеризуется аномально высокими величинами снеготазов и годового количества осадков, превышающими норму на 20-43 %, что повлекло за собой увеличение влажности почвогрунтов в течение продолжительного периода. В 2006 году средняя влажность верхнего 80-сантиметрового слоя почвы за теплый период более чем в 2 раза превысила аналогичные значения в сухой 2003 год. Повышенная влажность почвы и высокие запасы воды в снеге привели к снижению интенсивности промерзания почвы, повышению температуры многолетнемерзлых пород и временному увеличению глубины протаивания. Сочетание этих факторов стало условием активизации термокарстовых процессов, приведших к резкому увеличению площади озер в 2007-2008 годах.

Таким образом, основным фактором, приводящим к нарушению стабильного состояния термокарстовых форм, являются краткосрочные (1-3 года) периоды аномального повышения температуры верхнего слоя почвогрунтов. Такие периоды могут быть вызваны редким сочетанием гидрометеорологических условий. Установленные зависимости могут быть использованы для прогноза развития термокарстовых озер в будущем как на основе данных наблюдений за состоянием мерзлых пород, так и модельных расчетов.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-50030 мол_нр и при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (Мероприятие 6, TRAIN2019_1, ID: 38360672).

Acknowledgments

The study was carried out with the support of the RFBR (the research project №19-35-50030) and with the support of the Saint Petersburg state University (Event 6, TRAIN2019_1, ID: 38360672).

Список литературы

1. Босиков Н.П. Эволюция аласов Центральной Якутии. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1991. 128 с.
2. Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли. 2009. т. XIII. № 2. с. 16–26.
3. Кравцова В.И., Тарасенко Т.В. Динамика термокарстовых озер Центральной Якутии при изменениях климата с 1950 года // Криосфера Земли. 2011. т. XV. № 3. с. 31–42.
4. Нестерева М. И. Возникновение и распространение термокарстовых озер на территории Якутии // Молодой ученый. 2012. №9. с. 79–82.
5. Родионова Т.В. Исследования динамики термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам. Дис. ... канд. геогр. наук. Московский государственный университет, Москва, 2013, 196 с.
6. Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Васильев А.И. Пространственный анализ аласов Центральной Якутии с применением ГИС-технологий // Проблемы региональной экологии. 2018. № 6.с. 138-140.
7. GAME-Siberia and Frontier Observational Research System for Global Change. Dataset for Water and Energy Cycle in Siberia (Version 1), (edited by Rikie Suzuki and Tetsuo Ohata), GAME-Siberia and FORSGC, 2003.
8. Iijima Y., Fedorov A.N., Park H., Suzuki K., Yabuki H., Maximov T.C., Ohata T. Abrupt increases in soil temperatures following increased precipitation in a permafrost region, central Lena River basin, Russia // Permafrost and Periglacial Processes. 2010. 21. p. 30-41.