

CHANGES IN THE WATER-THERMAL REGIME OF PERMAFROST SWAMPS IN WESTERN SIBERIA IN RESPONSE TO CLIMATE WARMING

*Morozov A.P. *, Moskvina Yu.P.*

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

* antonmorozov43@yandex.ru

Citation: Morozov A.P., Moskvina Yu.P. 2025. Changes in the water-thermal regime of permafrost swamps in western siberia in response to climate warming. *Environmental dynamics and global climate change*. 16(1): 49–53.

DOI: 10.18822/edgcc635183

Рассмотрены изменения водно-теплового режима бугристых и полигональных болот зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири. Подробные исследования водно-теплового режима болот на данной территории проводились с 1971 по 1991 год. В настоящей работе используется математическая модель бугристых и полигональных болот, которая была разработана по результатам этих исследований.

В качестве входных параметров модели используются ежедневные метеорологические данные с 23 станций. Продолжительность наблюдений метеостанций составляет от 90 до 140 лет. Указанный период разделен на две части: до и после 1978 года.

Результаты расчётов указывают на повсеместное увеличение средних за тёплый период значений температуры воздуха: от 0.3 °C на юге до 1.6 °C на севере. В наиболее тёплые годы (2.5% обеспеченности) указанное повышение на юге зоны составляет 1.5 °C, а на Крайнем Севере – 3.5 °C. Наибольшие изменения в параметрах водно-теплового режима прослеживаются в увеличении глубины оттаивания торфяной залежи. Так, в среднем максимальное оттаивание увеличилось на 4–5 см, а в наиболее тёплые годы – на 7–10 см. Для севера полигональных болот разница в глубине оттаивания в отдельные годы достигает 16 см.

Предполагается, что изменения водно-теплового режима бугристых и полигональных болот будут способствовать последовательной эволюции структуры микроландшафтов. Смещение границ различных типов болот затруднено орографическими препятствиями и требует полномасштабной перестройки гидрографической сети и структуры микроландшафтов.

Ключевые слова: бугристые болота, полигональные болота, водно-тепловой режим болот, глубина оттаивания, изменение климата.

Changes in the water-thermal regime of swamps in the permafrost zone of Western Siberia are considered. Two types of swamps are prevalent in the study area: frost mound bogs (southern half of the area) and polygonal bogs (northern half of the area). The boundary between these swamps types is blurred and approximately matches the Polar Circle line. Detailed studies of the water-thermal regime of swamps in this area were carried out from 1971 to 1991 within the framework of the West Siberian expedition of the State Hydrological Institute. The present work uses a mathematical model of frost mound and polygonal bogs, which was developed based on the results of these studies.

Daily meteorological data, specifically daily data on air temperature, precipitation totals and total and lower cloudiness from 23 stations are used as input parameters of the model. The duration of observations of meteorological stations ranges from 90 to 140 years. The mentioned period is divided into 2 parts, before and after 1978. All calculations were limited to the warm period, the boundaries of which are the transitions of average daily air temperature through 0 °C.

The results of calculations indicate a widespread increase in the average warm period air temperature values, from 0.3 °C in the south to 1.6 °C in the north of the territory. In the warmest years (2.5% probability of exceeding) this increase in the south of the zone is 1.5 °C and in the extreme north is 3.5 °C. The greatest changes in the parameters of the water-thermal regime can be traced in the increase of the peat deposit thawing depth. In average, the maximum thawing increased by 4–5 cm, and in the warmest years by 7–10 cm. For the north of polygonal bogs, the difference in thawing depth in some years increases dramatically and reaches 16 cm. At the same time, it should be noted that the calculated thawing depth often exceeds the peat deposit thickness, especially in the northern part of polygonal bogs. In such cases, the peat deposit thawing values should be considered as potential.

It is supposed that changes in the water-thermal regime of frost mound and polygonal bogs will contribute to the sequential evolution of the micro-landscape structure. The displacement of the boundaries of different types of swamps is complicated by orographic obstacles, primarily by the Siberian Uvals and requires a full-scale reorganization of the hydrographic network and structure of micro-landscapes.

Key words: palsa bogs, polygonal bogs, water-thermal regime of swamps, thawing depth, climate change.

ВВЕДЕНИЕ

Всеобщее потепление климата, несомненно, приводит к изменению составляющих водного и теплового балансов различных природных ландшафтов. В свою очередь, указанные изменения могут вызывать смещение природных зон и частичный переход из одного вида ландшафта в другой. В данной статье рассмотрены изменения водно-теплового режима болот зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири, которая располагается севернее линии Сибирских Увалов. Для зоны многолетней мерзлоты характерно распространение двух типов верховых болот: бугристые (южная часть зоны) и полигональные (северная часть). Граница между этими типами болот в Западной Сибири приблизительно совпадает с линией полярного круга.

Водно-тепловой режим болот в Западной Сибири подробно был исследован в период с 1971 по 1991 год. Основные результаты исследований изложены в публикации [Novikov, 2009]. Данные исследования послужили основой для разработки математической модели для расчета основных водно-тепловых характеристик деятельного слоя болот зоны многолетней мерзлоты для различных микроландшафтов бугристых и полигональных болот, расположенных в указанном регионе.

Основной целью текущей работы являлась оценка изменчивости водно-теплового режима бугристых и полигональных болот Северо-Западной Сибири. Для этого были подготовлены и обработаны метеорологические данные, которые затем использовались в модели для расчётов показателей водно-теплового режима, которые, в свою очередь, были обобщены и проанализированы.

МЕТОДИКА

Для оценки водно-теплового режима болот зоны многолетней мерзлоты использовались ежедневные данные метеорологических станций по температуре воздуха, суммам осадков, общей и нижней облачности. Сведения о метеорологических станциях, привлекаемых для расчета параметров водно-теплового режима болот, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Метеостанции, данные которых использовались для расчёта водно-тепловых характеристик.

Table 1. Weather stations whose data were used to calculate water-heat balance characteristics.

Станции	Широта, ° с. ш.	Тип болот	Подзона	Год начала наблюдений
Берёзово	63.92	бугристые	юг	1881
Тарко-Сале	64.92	бугристые	юг	1937
Казым	63.72	бугристые	юг	1932
Толька	63.98	бугристые	юг	1947
Мужи	65.38	бугристые	север	1932
Полуй	66.03	бугристые	север	1953
Салехард	66.53	бугристые, полигональные	север, юг	1882
Тазовское	67.47	полигональные	юг	1932
Ныда	66.63	полигональные	юг	1947
Новый Порт	67.68	полигональные	юг	1924
Антипаюта	69.08	полигональные	юг	1949
Тамбей	71.48	полигональные	север	1936
Марресаля	69.71	полигональные	север	1914
им. Попова	73.33	полигональные	север	1933

Параметры водно-теплового режима болот исследуемой территории были рассчитаны по упомянутой ранее модели. Модель основана на решении уравнений водного, радиационного и теплового баланса для разных элементов мезорельефа бугристых и полигональных болот.

Обобщение материалов расчета проводилось по двум периодам: с начала наблюдений указанных метеостанций до 1978 года (с 1936 года, $n=42$ года) и с конца этого периода по настоящее время ($n=45$ лет). Деление по 1978 году является оптимальным для разделения гидротермического режима болот на прошлый квазистационарный и нестационарный современный для исследуемой территории. При оценке результатов рассмотрены изменения температуры воздуха только в тёплый период, а не всего года, поскольку в холодный период промерзание деятельного слоя болот происходит весьма интенсивно и заканчивается не позднее середины зимы. В связи с этим остальные параметры водно-теплового режима болот тоже ограничены в оценке тёплым периодом (период года с устойчивыми среднесуточными температурами воздуха выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

С целью некоторой детализации при обобщении получаемых результатов обе зоны бугристых и полигональных болот были разделены на южный и северный районы. Кроме того, оценки результатов проводились отдельно для лет с эмпирическими обеспеченностями средней температуры воздуха тёплого периода в 2.5%, 50% и 97.5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчет обеспеченных значений температуры воздуха (Табл. 2) показывает, что за последние 45 лет наблюдается повышение средней температуры в тёплые периоды года, причем в более южных районах это повышение составляет $0.3\text{--}0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как в северных районах повышение составило от 0.7 до $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для годов 50% обеспеченности).

Таблица 2. Осреднённые данные повышения температуры воздуха за тёплые периоды до и после 1978 г. в зонах полигональных и бугристых болот Западной Сибири, $^{\circ}\text{C}$.

Table 2. Averaged data on air temperature increase during warm periods before and after 1978 in the zones of polygonal and hummocky bogs of Western Siberia, $^{\circ}\text{C}$.

Тип болот	Район	Обеспеченность		
		2.5%	50%	97.5%
зона полигональных болот	север	3.5	1.6	0.5
	юг	1.6	0.7	0.6
зона бугристых болот	север	1.5	0.3	– 0.7
	юг	1.4	0.5	– 0.3

Особенно интенсивно повышение температуры отмечается в наиболее тёплые годы (до $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для годов 2.5% обеспеченности). В холодные годы повышение незначительно либо вовсе отсутствует. Такое повышение суммарной температуры теплых периодов определяет изменения составляющих водного и теплового баланса болот. Некоторые составляющие водно-теплового режима увеличиваются незначительно, такие как радиационный баланс и испарение. Изменение других составляющих будет зависеть от основного параметра – глубины оттаивания торфяной залежи болот. В связи с этим в данной статье рассмотрены изменения максимальной глубины оттаивания за тёплый период года на различных элементах микроландшафта бугристых и полигональных болот. В таблице 3 приведены результаты расчетов максимальных сезонных глубин оттаивания торфяной залежи болот на различных элементах микроландшафта.

Таблица 3. Максимальные глубины оттаивания болот зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири на конец тёплого периода, см.

Table 3. Maximum thawing depths of bogs in the permafrost zone of Western Siberia at the end of the warm period, cm.

			Период до 1978 года			Период после 1978 года		
Обеспеченность			2.5%	50%	97.5%	2.5%	50%	97.5%
бугристые болота	южная половина	бугры	60	52	43	69	56	47
		топи	80	70	61	88	74	65
	северная половина	бугры	55	46	38	64	50	41
		топи	74	63	54	83	68	59
полигональные болота	южная половина	полигоны	62	52	43	69	57	48
	северная половина	полигоны	41	33	25	57	45	31

В зоне полигональных болот оттаивание плоских полигонов и мочажин одинаково, поэтому приводятся средние значения параметров оттаивания. В этой зоне оттаивание в южной половине полигональных болот за последние 45 лет увеличилось в среднем на 4-5 см (около 10%), а в северной половине отмечается увеличение оттаивания почти в 2 раза. Наиболее существенные изменения прослеживаются в максимально теплые летние периоды, когда оттаивание за сезон увеличивается на 7-10 см (на севере до 16 см). В зоне бугристых болот глубина сезонного оттаивания увеличивается в среднем на 4-5 см, а в наиболее теплые годы – на 7-10 см.

Маршрутные обследования полигональных болот, выполненные в районе Бованенковского газового месторождения, показали, что мощность торфяной залежи здесь, как правило, меньше 30 см (в 97% случаев), и лишь в отдельных местах на полигонально-валиковых микроландшафтах она может достигать 80-100 см. Далее на север, в бассейне р. Пухуце-яха, мощность торфяной залежи не превышает 25 см. Поэтому в течение теплого периода года в северной половине зоны полигональных болот оттаивание происходит ежегодно, и, следовательно, повышение температуры воздуха в теплые периоды года не приведет к изменению их водно-теплого режима. Приводимые величины оттаивания для северного района полигональных болот следует рассматривать как «потенциальные».

Следует отметить, что некоторое увеличение оттаивания полигональных болот должно приводить к постепенному изменению структуры микроландшафтов, а возможно, и к некоторому смещению границ распространения основных типов болот. Следует предположить, что в первую очередь изменение коснется групп микроландшафтов. Так, плоскополигональные будут стремиться переходить в вогнутополигональные, а те, в свою очередь, в полигонально-валиковые и далее в полигонально-бугристые болота [Novikov, 2009]. Увеличение оттаивания на бугристых болотах будет приводить к увеличению площадей топей и к постепенной смене болотных комплексов бугристых болот на комплексы олиготрофных талых болот.

Вопрос о смещении современных границ болотных зон в северном направлении весьма сложный. Южная граница распространения мерзлых болот в настоящее время приблизительно совпадает с линией Сибирских Увалов. Однако и в 30-40 км южнее этой границы встречаются разрушающиеся бугристые структуры на наименее обводненных участках болот. Следует предположить, что переход к верховым типам талых болот ускорится. Сибирские Увалы, несмотря на относительно незначительные высоты (150-170 м в абсолютных отметках), все же являются некоторым препятствием для перехода мерзлых болот в талые. Поэтому, по нашему мнению, в ближайшей перспективе такого перехода не последует.

Граница между бугристыми и полигональными болотами имеет ширину около 70 км. Следует предположить, что она будет смещаться в северном направлении, однако скорость указанного смещения незначительна, поскольку рассматриваемый процесс требует формирования иной гидрографической сети болот, а также структурных изменений микроландшафтов. Кроме того, прогноз изменения границ болотных зон весьма затруднен на фоне продолжающегося изменения климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге можно отметить, что изменения в некоторых элементах водно-теплового режима арктических болот на исследуемой территории, в первую очередь глубины сезонного оттаивания торфяной залежи, будут способствовать последовательной эволюции структуры болотных микроландшафтов. Процесс смещения границы между полигональными и бугристыми болотами в случае дальнейшего потепления будет ускоряться, однако этому могут воспрепятствовать орографические препятствия.

ЛИТЕРАТУРА

Novikov S.M. (ed.) 2009. Hydrology of swamps in the permafrost zone of Western Siberia. VVM, Saint-Petersburg, 536 p. (in Russian). [Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / под ред. С.М. Новикова. Санкт-Петербург: ВВМ. 536 с.].

Поступила в редакцию: 19.08.2024
Переработанный вариант: 28.12.2024
Принято в печать: 23.01.2025