

## Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-1-113-126>

УДК 551.345.2

**Изменения водного и теплового режима болот Западной Сибири за последние 50 лет: синтез данных наблюдений и моделирования**О.А. Анисимов<sup>1</sup>, А.П. Морозов<sup>1,2</sup>, Ю.П. Москвин<sup>1</sup><sup>1</sup> ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия✉ [aaa@hydrology.ru](mailto:aaa@hydrology.ru)

ID OAA, 0000-0002-9515-4576; APM, 0009-0004-6532-1128

**Аннотация.** Проведены расчеты температуры торфяной залежи, мощности сезонно-талого слоя и уровня надмерзлотных вод бугристых и полигональных болот криолитозоны Западной Сибири в период 1971–2024 гг. Использовалась нестационарная модель многолетней мерзлоты CryoGrid с новым блоком, описывающим водный и тепловой режимы многолетнемерзлых болот. Для расчетов использовались данные реанализа ERA5 суточной дискретности по 8 метеорологическим параметрам. Модель была верифицирована на данных комплексных экспедиционных исследований Государственного гидрологического института, проводившихся в 1971–1992 гг. на 10 болотных стационарах южной и северной криолитозоны Западной Сибири. Расчеты указывают на значительные изменения состояния многолетнемерзлых болот за 50 лет. Их скорость увеличилась в последние 25 лет и составила в среднем по зонам распространения полигональных и бугристых болот, соответственно, 1,35 и 1,10 °C/10 лет для температуры торфяной залежи на глубине 20 см; 9,6 и 5,2 см/10 лет для мощности сезонно-талого слоя и –1,1 и –2,9 см/10 лет для уровня надмерзлотных вод.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые болота, Западная Сибирь, модель CryoGrid, водно-тепловой режим, торфяные залежи

**Для цитирования:** Анисимов О.А., Морозов А.П., Москвин Ю.П. Изменения водного и теплового режима болот Западной Сибири за последние 50 лет: синтез данных наблюдений и моделирования. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2026;72(1):113–126. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-1-113-126>

Поступила 19.12.2025

После переработки 17.02.2026

Принята 23.02.2026

**Changes in the hydrological and thermal regime of permafrost bogs in the past 50 years: synthesis of observational data and modelling**Oleg A. Anisimov<sup>1</sup>, Anton P. Morozov<sup>1,2</sup>, Yuriy P. Moskvina<sup>1</sup><sup>1</sup> Federal State Budgetary Institution of the State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia<sup>2</sup> State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia✉ [aaa@hydrology.ru](mailto:aaa@hydrology.ru)

ID OAA, 0000-0002-9515-4576; APM, 0009-0004-6532-1128

© Авторы, 2026

© Authors, 2026

**Abstract.** Two types of frozen bogs, palsa mires and polygonal marshes, occupy up to 30 % of the permafrost terrain in West Siberia. Palsa mires span the territory from the Arctic Circle down to approximately 62° N in continuous, discontinuous and sporadic permafrost zones; polygonal marshes are located northward from the Arctic Circle. The hydro-thermal regime of permafrost bogs is characterized by three key parameters, namely, soil temperature, active-layer thickness (ALT), and soil water table depth. We used the CryoGrid community model with daily ERA-5 reanalysis meteorological data to study changes in these parameters in the period 1971–2024. The model was calibrated using an extensive historical data set of the State Hydrological Institute for 10 permafrost bog plots, which was built up in the course of the field expeditions in West Siberia in the 1971–1992 period. The calibrated CryoGrid model demonstrated reasonably good performance in reproducing observed parameters of the hydro-thermal regime of permafrost bogs in a variety of climatic, bio-physiographic and permafrost conditions. The mean square errors of the calculated parameters for polygonal marshes/palsa mires were the following: ALT error (3.8 ÷ 5.6 cm)/(5.2 ÷ 5.9 cm); soil temperature error (1.2 ÷ 1.5 °C)/(0.8 ÷ 1.3 °C) and soil water level error (6.8 ÷ 10.5 cm)/(7.9 ÷ 9.7 cm). The modelling results suggest that changes in the hydro-thermal regime of permafrost bogs have increased in the past 25 years. Calculated over the 2000–2024 period trends, averaged over the areas occupied by polygonal marshes and palsas, were, correspondingly, as follows: 1.35 and 1.10 °C/10y for soil temperature at 20 cm depth; 9.6 and 5.2 cm/10y for ALT; –1,1 and –2,9 cm/10y for soil water levels.

**Keywords:** permafrost bogs, West Siberia, CryoGrid model, hydro-thermal regime, peatland

**For citation:** Anisimov O.A., Morozov A.P., Moskvina Yu.P. Changes in the hydrological and thermal regime of permafrost bogs in the past 50 years: synthesis of observational data and modelling. *Arctic and Antarctic Research*. 2026;72(1):113–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-1-113-126>

Received 19.12.2025

Revised 17.02.2026

Accepted 23.02.2026

## Введение

В криолитозоне Западной Сибири широко распространены многолетнемерзлые болота. Их разделяют на два основных типа: северные полигональные, ограниченные с юга Северным полярным кругом, и бугристые, расположенные южнее на территории вплоть до 62–63° с. ш [1]. Болота вносят заметный вклад в углеродный цикл, что определяет их роль в региональной и глобальной экосистеме [2, 3]. В Западной Сибири, в особенности на Ямале, они существенно влияют на характер экономического освоения региона, затрудняя строительство инфраструктуры, в первую очередь протяженных линейных сооружений. Торфяная залежь болот имеет специфические теплофизические свойства (малая теплопроводность и большая полевая влагоемкость), которые обуславливают нехарактерный для обычных грунтов водно-тепловой режим [4, 5]. Эти факторы определяют необходимость отдельного исследования болот.

Исследования водно-теплового режима болот проводились с начала XX в. Многочисленные наблюдения на болотах в основном Европейской зоны России позволили предложить ряд решений по определению расчетных характеристик болот [6]. Однако эти ранние исследования касались лишь наиболее распространенных талых болот, в то время как значительная часть болот также расположена в зоне многолетней мерзлоты. Так, в Западной Сибири севернее Сибирских Увалов заболоченность составляет около 30 %.

В статье рассматриваются олиготрофные, т. е. расположенные преимущественно на возвышенных водораздельных пространствах, бугристые и полигональные многолетнемерзлые болота. Основное отличие их гидрологии от болот талой зоны заключается в смене фронтального фильтрационного стока, господствующего на талых болотах, на сток болотных вод по схеме, напоминающей русловую [7]. Надмерзлотные воды с возвышенных элементов мезорельефа стекают в микропонижения

болотного микроландшафта (западины, ложбины, топи), в результате сток с многолетнемерзлых болот происходит по подобию гидрографической сети.

Первые исследования многолетнемерзлых болот криолитозоны были направлены на их описание и классификацию [8]. Локализованность этих исследований (устье р. Оби, район г. Салехарда) привела к ошибочным оценкам процентных соотношений болотных микроландшафтов. В дальнейшем классификация мерзлых болот и пространственное распространение микроландшафтов были детально изучены по всей территории севера Западной Сибири.

До середины 1970-х гг. водно-тепловой режим многолетнемерзлых болот криолитозоны оставался неизученным. Открытие и освоение большого количества нефтяных и газовых месторождений на севере Западной Сибири, в особенности проектирование и строительство линейных сооружений, потребовали конкретных данных о различных водно-тепловых и стоковых характеристиках этих болот. Поэтому в 1970-х гг. Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) были начаты полномасштабные комплексные экспедиционные исследования всех характеристик болот в различных регионах севера Западной Сибири. Основная цель заключалась в проведении гидрологических и теплбалансовых исследований, в результате которых планировалось получить алгоритмы расчета величин стока, испарения, температуры, влажности и глубины оттаивания торфяной залежи, уровня надмерзлотных (болотных) вод (УНВ) для различных элементов микрорельефа болот с учетом преобладающей растительности в любой точке севера Западной Сибири.

Для выполнения поставленной задачи на различных болотных массивах были организованы стационарные наблюдения за составляющими водно-теплого режима, такими как радиационный баланс; испарение и сток с болот, определяемые различными методами; УНВ; мощность сезонно-талого слоя (СТС) и температурный режим торфяной залежи; абсолютная влажность торфа. Все виды наблюдений проводились на различных элементах мезорельефа болот и на нескольких площадках, занятых разной растительностью. Для репрезентативного охвата всей территории севера Западной Сибири были выбраны несколько районов проведения наблюдений, в которых были созданы 10 болотных стационаров. В период 1971–1991 гг. были организованы исследования болотных массивов в следующих районах: Тазовское — 1971 г., Пангода — 1974–1975 гг., Пур-Пе — 1976–1977 гг., Тыдэотта — 1978–1980 гг., Хейги-Яха — 1981–1989 гг., Пяседей-Яха — 1981–90 гг., Пухуце-Яха — 1985–1990 гг. Результаты этих исследований обобщены в монографии [9].

Они позволили разработать эмпирические модели водно-теплого режима для всех типов болот этой зоны [9, 10]. На протяжении последующих трех десятилетий данные расчетов по этим моделям использовались заинтересованными организациями для проектирования объектов освоения в криолитозоне Западной Сибири.

В последние десятилетия в связи с реализацией программы социально-экономического развития Арктики растет запрос на сведения о состоянии многолетнемерзлых болот. Однако ситуация полностью изменилась. Масштабные экспедиционные исследования, которые могли бы актуализировать эмпирические данные, после 1990-х гг. не проводились. В результате эмпирические модели, построенные на данных наблюдений в период, предшествующий современному изменению климата, и ранее выполнявшие свои функции, не могут адекватно описать процессы, происходящие в изменившихся условиях. Это обуславливает необходимость перехода к математическим моделям многолетнемерзлых болот, основанным на фундаментальных

законах физики и уравнениях, инвариантных к изменчивым внешним условиям. Как все модели, они не лишены необходимости использования реальных данных для верификации и усовершенствования.

Целью работы была модельная актуализация данных о трех основных характеристиках многолетнемерзлых болот Западной Сибири: температуре торфяной залежи, мощности СТС и УНВ. Для этого был выполнен анализ математических моделей многолетнемерзлых грунтов различной сложности, осуществлен оптимальный выбор модели с учетом наличия необходимых для ее валидации и проведения расчетов данных. Выбранная модель была адаптирована для расчетов характеристик многолетнемерзлых болот криолитозоны. Была проведена ее калибровка и валидация по историческим данным, полученным в ходе комплексных экспедиционных исследований в период 1971–1991 гг. Модель была применена для расчета современных значений параметров многолетнемерзлых болот Западной Сибири, по результатам которых были построены актуализированные на текущий момент цифровые карты расчетных параметров.

### Методика и данные

Первоначально планировалось использовать нестационарную модель водно-теплового режима многолетнемерзлых грунтов, разработанную в Государственном гидрологическом институте [11]. Выбор был обусловлен тем, что собственная программная разработка позволяет легко модифицировать численный алгоритм, адаптируя его под специфические условия многолетнемерзлых болот. Вместе с тем авторские модели исключают дальнейшее развитие работ другими исследователями на той же методической и программной основе. Поэтому была использована модель общего доступа с открытым кодом CryoGrid Community model [12] в ее наиболее полной версии.

Модель CryoGrid ранее не применялись для многолетнемерзлых болот, главными особенностями которых являются низкая теплопроводность и большая полевая влагемкость торфа, достигающая 76 %. Поэтому в базовый алгоритм были внесены изменения, позволившие учесть реальные теплофизические и гидравлические свойства торфяной залежи, задаваемые по данным экспедиционных исследований ГГИ. Было также учтено тепловое влияние растительности, которая на болотах криолитозоны представлена сфагновыми мхами и лишайниками.

В расчетах по модели CryoGrid были использованы суточные метеоданные реанализа ERA5 за период 1941–2024 гг. по 8 метеорологическим параметрам: температура воздуха на высоте 2 м, °C; интенсивность выпадения жидких и твердых осадков, мм/сутки; средняя скорость ветра на высоте 10 м, м/с; удельная влажность, кг/кг; приходящая коротковолновая и длинноволновая радиация, Вт/м<sup>2</sup> и атмосферное давление на уровне поверхности, Па. Первые 30 лет расчета использовались для «разгона» модели от задаваемых начальных условий, в процессе которого достигался баланс между вертикальными профилями всех рассчитываемых гидротермических параметров и актуальными величинами метеорологических параметров. Последующий диагностический расчет проводился за период 1971–2024 гг. по сетке пространственного разрешения 1°×1° по широте и долготе, охватывающей Западную Сибирь.

Для калибровки и валидации модели использовался исторический архив данных экспедиционных наблюдений ГГИ на 10 болотных стационарах в криолитозоне Западной Сибири, проводившихся в период 1971–1992 гг. Местоположение болотных стационаров в зонах распространения бугристых и полигональных многолетнемерзлых болот показано на рис. 1.

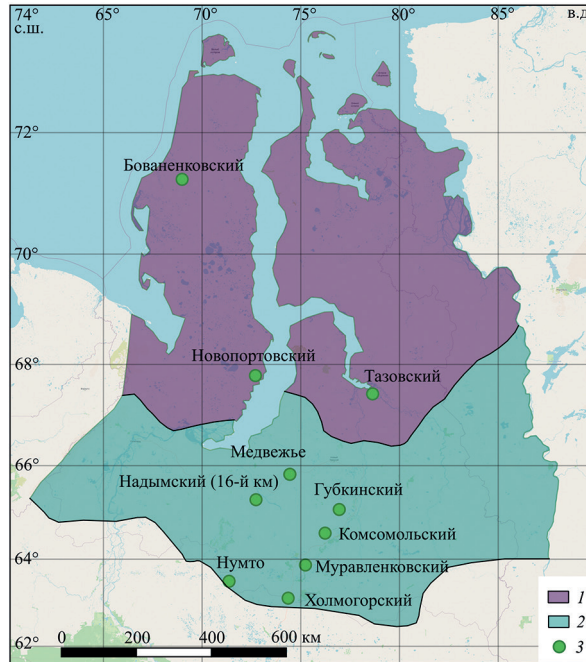


Рис. 1. Области распространения полигональных (1) и бугристых (2) болот в криолитозоне Западной Сибири и местоположение болотных стационаров ГГИ (3)

Fig. 1. Areal of polygonal (1) and palsal (2) bogs in the West Siberian permafrost region and location of the bog monitoring sites of the State Hydrological Institute (3)

### Калибровка и валидация модели

Наиболее полная версия CryoGrid относится к классу высоко комплицированных нестационарных моделей, основанных на фундаментальных уравнениях физики и гидродинамики, содержащих большое число параметров и констант. В расчетах по времени используется прямая схема Эйлера первого порядка.

Для устойчивости этой схемы и всего алгоритма необходимо, чтобы значения влияющих и расчетных параметров и их временные приращения всегда были согласованы. Это достигается использованием малого шага по времени, от 1 суток до 10 секунд, и максимально точным заданием параметров, оказывающих сильное влияние на результаты расчета, с тем чтобы они не выходили за пределы физически обоснованных величин. Для определения таких параметров был проведен анализ чувствительности модели, результаты которого представлены в таблице.

Анализ чувствительности модели проводился на примере болотного стационара Новопортовский, для которого имеется наибольшее количество данных наблюдений. По данным реанализа ERA5 были составлены временные ряды 8 метеорологических переменных для соответствующей ячейки сетки. Ряды задавались на входе модели для проведения расчетов за период 1941–1985 гг., первые 30 лет использовались для «разгона» модели. Мощность торфяной залежи и ее теплофизические параметры задавались по имеющимся данным наблюдений. По ним проводился расчет для исходных величин влияющих параметров, в таблице соответствующие

Таблица

Оценка чувствительности расчетных характеристик к вариациям влияющих параметров  
Table

## Model sensitivity to input parameters

Вариации параметров		$T_{20}$ , °C	СТС, см	УНВ, см
Твердые осадки	50 %	-7,64	56,5	-10,8
	75 %	-5,86	56,2	-10,6
	<b>100 %</b>	<b>-3,88</b>	<b>56,3</b>	<b>-10,6</b>
	125 %	-2,18	59,2	-9,6
	150 %	-0,98	73,8	-9,1
Жидкие осадки	50 %	-3,81	53,8	-15,5
	75 %	-3,86	55,9	-13,5
	<b>100 %</b>	<b>-3,88</b>	<b>56,3</b>	<b>-10,6</b>
	125 %	-3,86	56,3	-7,1
Мощность торфяной залежи	150 %	-3,76	56,3	-5,3
	40 см	-5,40	87,5	-9,2
	55 см	-4,30	75,3	-10,5
	65 см	<b>-3,88</b>	<b>56,3</b>	<b>-10,6</b>
	85 см	-3,75	53,5	-10,7
Наименьшая полевая влагемкость торфа	100 см	-3,65	53,0	-10,8
	55 %	-4,42	58,8	-8,9
	65 %	-4,13	57,6	-9,7
	<b>75 %</b>	<b>-3,88</b>	<b>56,3</b>	<b>-10,6</b>
	85 %	-3,71	54,5	-11,4
Льдистость минерального грунта	95 %	-3,39	49,8	-16,3
	10 %	-4,03	57,1	-10,7
	<b>20 %</b>	<b>-3,88</b>	<b>56,3</b>	<b>-10,6</b>
	30 %	-3,78	54,1	-10,6
	40 %	-3,56	48,5	-10,5
	50 %	-3,48	47,6	-10,4

*Примечание.* Полу жирным выделены исходные значения параметров и рассчитанные по ним характеристики.

*Note.* The initial values of the input parameters are indicated in bold.

величины выделены жирным шрифтом. Рассчитанные величины мощности СТС, температуры торфяной залежи на глубине 20 см и УНВ осреднялись за базовый период 1971–1985 гг., который характеризуется условно-стационарным климатом. Затем проводились серии повторных расчетов с возмущенными значениями одного из влияющих параметров, указанных во втором столбце таблицы, и исходными значениями остальных параметров. В этих расчетах суммы жидких и твердых осадков варьировались в пределах от 0,5 до 1,5 от исходных величин, определяемых по данным ERA5. Остальные влияющие параметры варьировались в диапазоне, указанном во втором столбце таблицы.

Далее была проведена валидация модели, в ходе которой рассчитанные данные сравнивались с наблюдениями. На рис. 2 на примере теплого периода 1987 г. показан вертикальный разрез верхнего метрового слоя торфяной залежи, на котором

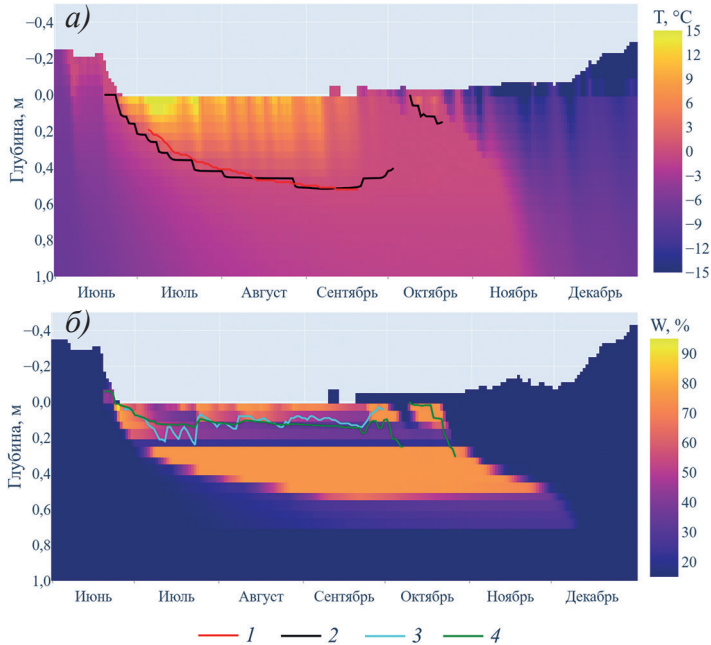


Рис. 2. Рассчитанные и наблюдаемые на стационаре Новопортовский за июнь–декабрь 1987 г. параметры: *а* — температура торфяной залежи ( $T$ , °C) и мощность СТС (м); *б* — влажность почвы ( $W$ , %) и УНВ (м). 1 и 2 — наблюдаемые и расчетные мощности СТС, м; 3 и 4 — наблюдаемые и расчетные УНВ

Fig. 2. Bog parameters calculated and observed at Novoportovskii site for June–December 1987: *a* — soil temperature ( $T$ , °C) and ALT; *b* — soil moisture ( $W$ , %) and soil water level (m). 1 and 2 — observed and calculated ALT, m; 3 and 4 — observed and calculated soil water level, m

прослеживаются изменения во времени вертикального профиля температуры ( $T$ , °C), влажности почвы ( $W$ , %), мощности СТС (м) и УНВ (м), рассчитанные по модели и по данным наблюдений на стационаре Новопортовский.

На рис. 3 показано облако рассчитанных и измеренных величин мощности СТС и уровней надмерзлотных вод за различные годы на 5 болотных стационарах и линейные зависимости, аппроксимирующие связь между ними. По наклону аппроксимирующих линий видно, что модель завышает наблюдения, в особенности по мощности СТС. Точность расчетов оценивалась величиной RMSE (квадратный корень из среднеквадратичной разности расчетов и наблюдений), значение которой составляет 9,4 см для рис. 3а и 7,5 см для рис. 3б. При том, что в целом точность расчета достаточно высока, видно, что модель значительно, до 20–25 см, завышает мощность СТС на двух стационарах, Комсомольский и Медвежье, расположенных на бугристых болотах. По-видимому, это обусловлено особенностями данных стационаров, которые не учитываются в модели.

По данным экспедиционных измерений, мощность торфяной залежи к югу от зоны полигональных болот в буграх составляет от 2 до 7 м, т. е. заведомо превышает мощность СТС как для прошлых, так и для современных климатических условий. Для топей ситуация иная, там возможно образование таликов, но без наблюдений достоверно установить это расчетным путем нельзя. С учетом этого на всех гра-

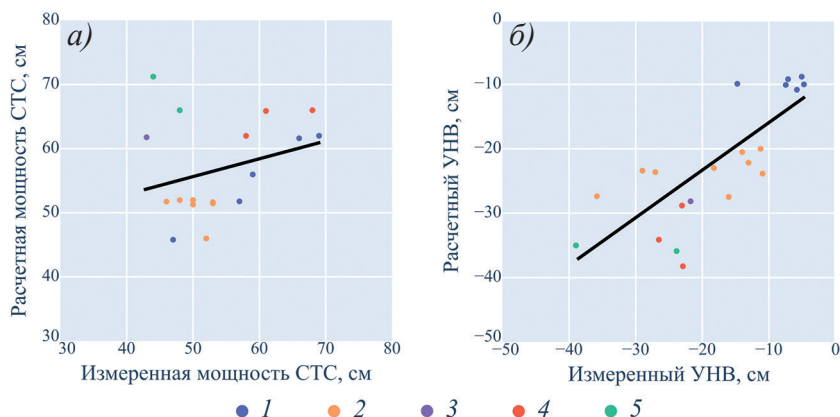


Рис. 3. Сравнение рассчитанных и измеренных величин мощности СТС (а) и УНВ (б) за различные годы. Цветом выделена принадлежность к стационарам ГГИ: 1 — Бованенковский, 2 — Новопортовский, 3 — Медвежье, 4 — Губкинский, 5 — Комсомольский

Fig. 3. Comparison of calculated and observed values of ALT (a) and soil water levels (b). The SHI sites are highlighted with different colors: 1 — Bovanenkovskii, 2 — Novoportovskii, 3 — Medvezhe, 4 — Gubkinskii, 5 — Komsomolskii

фиках для бугристых болот приведены результаты расчетов для положительных форм рельефа (торфяные бугры). В модели не учтено, что торфяные бугры имеют различную высоту. Это затрудняет непосредственное сравнение расчетов с наблюдениями и может быть причиной полученных расхождений расчетных и измеренных мощностей СТС и УНВ в отдельных точках на рис. 3.

### Обсуждение результатов

Главной целью работы является актуализация сведений о состоянии многолетнемерзлых болот Западной Сибири, которые основаны на экспедиционных исследованиях почти полувековой давности. Обсуждение результатов моделирования целесообразно начать с анализа изменений влияющих климатических параметров за истекший период.

Как показал проведенный анализ чувствительности модели, наибольшее влияние на водно-тепловой режим многолетнемерзлых болот оказывают температура воздуха теплого периода и сумма осадков холодного периода, которая определяет высоту снежного покрова. Карты на рис. 4 показывают разности этих параметров, осредненных за период 1941–1977 гг. и 1978–2024 гг. Эти карты дополняют графики, показывающие изменения во времени и линейные тренды осредненных по зонам распространения бугристых и полигональных болот среднегодовой температуры воздуха и годовых сумм осадков.

Решающим фактором воздействия на многолетнемерзлые болота, несомненно, является рост температуры воздуха, наблюдаемый во все сезоны года на протяжении четырех последних десятилетий. Годовой (показан на рис. 4) и осенний тренды составляют около  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ ; весенний — более  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ , в марте и апреле доходя до  $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ ; зимний тренд наименее выражен, около  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$  (исключая февраль) и летний около  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ .

## Changes in the hydrological and thermal regime of permafrost bogs in the past 50 years...

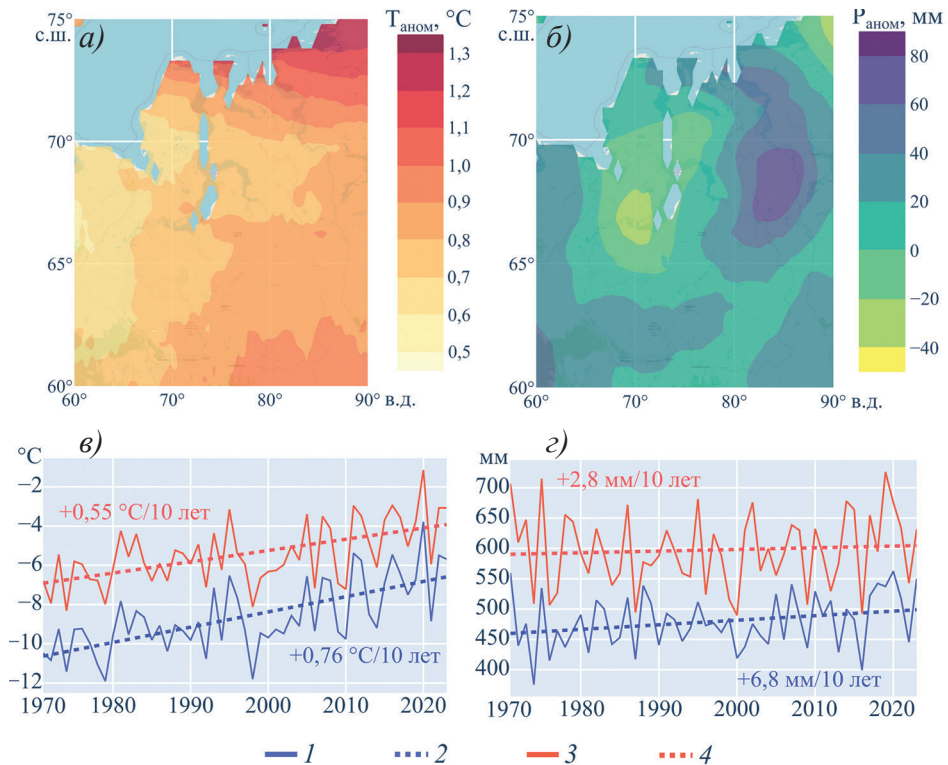


Рис. 4. Региональные изменения температуры воздуха и осадков. Верхний ряд — отклонения средних за период 1978–2024 гг. средней температуры воздуха теплого периода ( $T_{\text{аном}}, ^\circ\text{C}$ ) (а) и сумм зимних осадков ( $P_{\text{аном}}, \text{мм}$ ) (б) от соответствующих значений за период 1941–1977 гг. Нижний ряд — изменения и линейные тренды осредненной по зонам распространения полигональных (1, 2) и бугристых (3, 4) болот среднегодовой температуры воздуха,  $^\circ\text{C}$  (в); и годовых сумм осадков, мм (з) за период 1970–2024 гг.

Fig. 4. Regional air temperature and precipitation changes. Upper panels — differences between the mean air temperature of the warm period ( $T_{\text{аном}}, ^\circ\text{C}$ ) (a) averaged over the periods 1978–2024 and 1941–1977 and winter precipitation sums ( $P_{\text{аном}}, \text{мм}$ ) (б). Lower panels — the bogs' mean annual air temperature,  $^\circ\text{C}$  (в) averaged over the zones of polygonal (1, 2) and palsa (3, 4) and annual precipitation sum, мм (з), with their linear trends for the 1970–2024 period

Тренды осадков в современный период слабо выражены и незначимы. Можно отметить их разнонаправленность в пределах изучаемого региона. Годовой тренд на территории вокруг Обской губы и на крайнем северо-востоке региона слабоотрицательный, прежде всего за счет лета и осени, тогда как на остальной территории наблюдается рост осадков. В среднем по всему региону годовой тренд осадков составляет около 10 мм/10 лет. Тренд зимних осадков, формирующих снежный покров, в десять раз меньше, не превышает 1 мм/10 лет и статистически незначим. Из данных таблицы следует, что изменение зимних осадков в пределах  $\pm 25\%$  меняет среднегодовую температуру на 1,5–2  $^\circ\text{C}$ , но довольно мало влияет на мощность СТС и УНВ.

На рис. 5 показаны результаты модельных расчетов изменения показателей водного и теплового режимов полигональных и бугристых болот за 1971–2024 гг.,

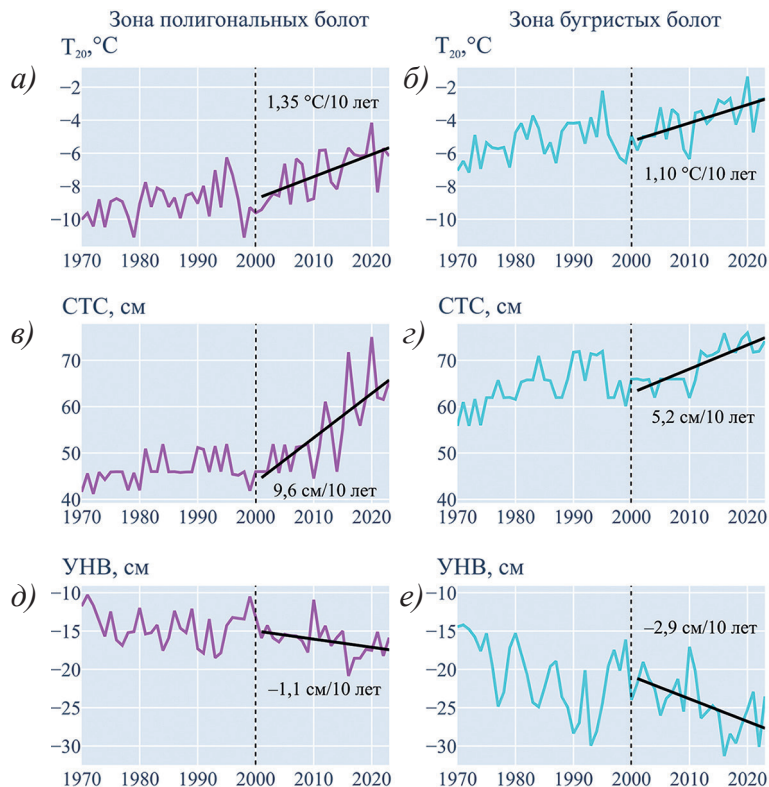


Рис. 5. Средние по зонам полигональных и бугристых болот средние годовые значения температуры торфяной залежи на глубине 20 см, °C (а, б); мощности СТС, см (в, з); УНВ, см (д, е) и их линейные тренды за период 2001–2024 гг.

Fig. 5. Mean annual soil temperature at 20 cm depth, °C (a, б) averaged over the areal of polygonal and palsa bogs in West Siberia; active-layer thickness, cm (в, з); soil water levels, cm (д, е) and their linear trends in the period 2001–2024

осредненные по ареалам их распространения в Западной Сибири. На рис. 6 показаны карты этих же показателей, рассчитанные для базового периода 1971–1985 гг. и современного периода 2015–2024 гг.

В статье приведены данные о среднегодовой температуре грунта на глубине 0,2 м, которые репрезентативно отражают термический режим верхнего слоя торфяной залежи. До тех пор, пока эта величина находится в отрицательном диапазоне, мерзлота будет сохраняться, поскольку на подошве СТС из-за температурной сдвижки она всегда ниже. Заметим, что в геокриологии общепринято использовать другую метрику, температуру на подошве СТС или же на уровне нулевых годовых амплитуд. В нашем случае это нецелесообразно, поскольку на рассмотренном интервале времени мощность СТС значительно меняется и неясно, какой конкретной глубине будут соответствовать привязанные к ней температурные данные.

Результаты расчетов, показанные на рис. 5 и 6, указывают на то, что происходит увеличение температуры торфяной залежи, особенно выраженное в зоне распространения полигональных болот. Здесь средняя величина тренда среднегодовой

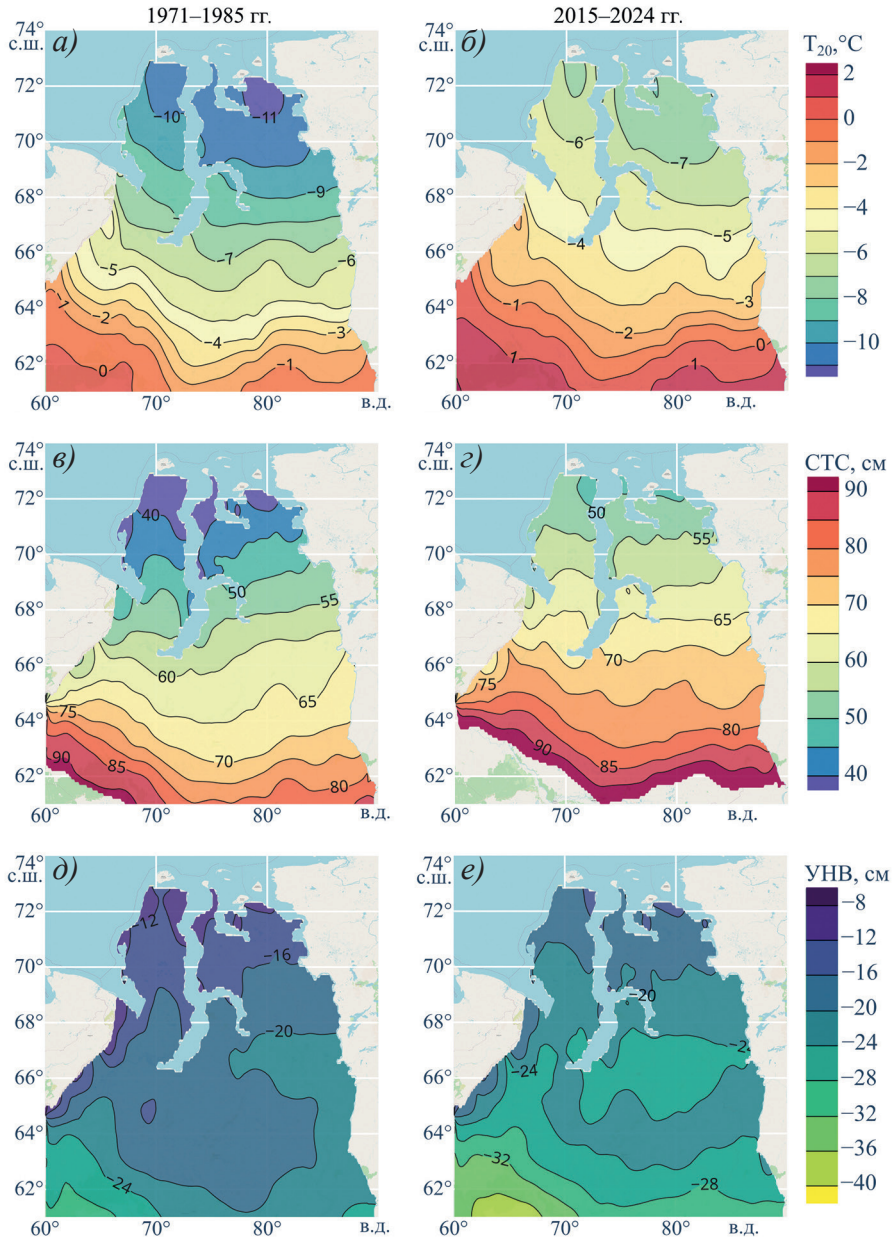


Рис. 6. Расчетные характеристики многолетнемерзлых болот Западной Сибири для базового периода 1971–1985 гг. и современного периода 2015–2024 гг.: среднегодовая температура торфяной залежи на глубине 20 см,  $^\circ\text{C}$  (а, б); мощность CTC, см (в, г) и уровень надмерзлотных вод, см (д, е)

Fig. 6. Calculated mean annual soil temperature at 20 cm depth,  $^\circ\text{C}$  (a, б); ALT, cm (в, г); and soil water level, cm (д, е) in the baseline period 1971–1985 and modern period 2015–2024 for the permafrost bogs in West Siberia

температуры на глубине 20 см за последние 25 лет составляет 1,35 °С/10 лет. Это более чем в 1,5 раза превышает скорость увеличения температуры воздуха и обусловлено совместным воздействием других меняющихся ландшафтных факторов. В зоне бугристых болот модельные расчеты указывают на рост температуры торфяной залежи со средней скоростью 1,10 °С/10 лет. Закономерно происходит увеличение мощности СТС, также более выраженное в зоне полигональных болот (в среднем на 9,6 см/10 лет), по сравнению с зоной бугристых болот (в среднем 5,2 см/10 лет).

Модельные расчеты указывают также на значительные изменения водного режима. Это проявляется в повсеместном снижении уровня надмерзлотных вод. Наибольшие изменения расчеты дают для зоны распространения бугристых болот на юге криолитозоны Западной Сибири, средний тренд за последние 25 лет составляет –2,9 см/10 лет. На полигональных болотах оценки тренда заметно ниже, в среднем –1,1 см/10 лет.

### Основные выводы

Полученные в работе результаты позволяют сформулировать следующие основные выводы.

1. Изменение климата за последние 50 лет привело к значительному росту температуры воздуха в зоне распространения бугристых и полигональных болот криолитозоны Западной Сибири во все сезоны года и к относительно небольшим разнонаправленным по территории изменениям атмосферных осадков.

2. Уникальные по продолжительности, полноте и охвату измеряемых параметров данные экспедиционных исследований многолетнемерзлых болот, полученные в период 1971–1992 гг., в настоящее время перестали соответствовать современным климатическим условиям. Они могут быть актуализированы либо повторными экспедиционными исследованиями, которые в последние 30 лет на тех же стационарах не проводились, либо с использованием модельного реанализа.

3. Нестационарная модель водно-теплового режима подстилающей поверхности CryoGrid, использованная в данной работе, показала хорошие результаты по воспроизведению данных экспедиционных наблюдений на 10 болотных стационарах криолитозоны Западной Сибири по трем основным параметрам: температуре торфяной залежи на глубине 20 см, мощности СТС и уровню надмерзлотных вод, включая их внутригодовую и межгодовую динамику.

4. Проведенные при помощи модели CryoGrid расчеты за период 1971–2024 гг. позволили актуализировать сведения об основных параметрах водно-теплового режима болот криолитозоны Западной Сибири. Повсеместно и для всех типов многолетнемерзлых болот произошло увеличение температуры торфяной залежи, мощности СТС и понижение уровня надмерзлотных вод с дифференциацией этих изменений по зонам распространения бугристых и полигональных болот. Скорость изменений увеличилась в последние 25 лет, особенно сильно это проявилось в увеличении мощности СТС.

5. Модель CryoGrid была откалибрована по данным конкретных 10 болотных стационаров, расположение которых (рис. 1) не охватывает весь спектр современной изменчивости климата (рис. 4а, б). Поэтому представленные результаты носят оценочный характер и для практического использования требуется их уточнение на основе более детальной типизации морфологии болот.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Финансирование работы осуществлялось в рамках темы 1.5 государственной программы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации».

**Вклад авторов.** ОАА, постановка задачи, сопоставительный анализ различных моделей многолетне-мерзлых грунтов, анализ результатов модельных расчетов, концептуализация и написание текста статьи; АПМ, адаптация модели CryoGrid для многолетнемерзлых болот, подготовка массивов метеорологических данных, проведение модельных расчетов, построение рисунков и таблицы, написание разделов статьи; ЮПМ, предоставление, описание и анализ исторических данных комплексных болотных экспедиций, в том числе из личного архива, написание введения к статье.

**Competing interests.** Authors declare no competing interests.

**Funding.** The work was funded within the framework of topic 1.5 of the State Program “Scientific and Technological Development of the Russian Federation”.

**Authors contribution.** OAA, comparative analysis of permafrost models of different complexity, numerical experiments set-up, analysis of the model results, conceptualization and writing of the paper; APM, adaptation of the CryoGrid community model to permafrost bogs, preparation of the meteorological data set, model set-up and calculations, preparation of figures and tables, writing sections of the paper; YPM, collection, description and analysis of the historical field data, writing Introduction section.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия. *Известия РАН. Серия географическая*. 2005;(5):39–50.  
Vompersky S.E., Sirin A.A., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A., Maikov L.A. Peatlands and paludified lands of Russia: attempt of analyses of spatial distribution and diversity. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2005;(5):39–50. (In Russ.).
2. Baird A.J., Belyea L.R., Comas X., Reeve A.S., Slater L.D. (Eds.) *Carbon Cycling in Northern Peatlands*. Washington, D. C., USA: American Geophysical Union; 2009: 299 p. <https://doi.org/10.1029/GM184>
3. Kirpotin S.N., Berezin A.E., Bazanov V.A., Polishchuk Y.M., Vorobiov S.N, Mironycheva-Tokoreva N.P., Kosykh N.P., Volkova I.I., Dupre B., Pokrovsky O.S., Kouraev A.A., Zakharova E.E., Shirokova L.S., Mognard N., Biancamaria S., Viers J., Kolmakova M.V. Western Siberia wetlands as indicator and regulator of climate change on the global scale. *International Journal of Environmental Studies*. 2009;66(4):409–21. <https://doi.org/10.1080/00207230902753056>
4. Романов В.В. *Гидрофизика болот*. Л.: Гидрометеиздат; 1961. 359 с.
5. Kujala K., Seppälä M., Holappa T. Physical properties of peat and palsa formation. *Cold Regions Science and Technology*. 2008;52(3):408–14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.08.002>
6. Иванов К.Е. *Основы гидрологии болот лесной зоны и расчеты водного режима болотных массивов*. Л.: Гидрометеиздат; 1957. 500 с.
7. Batuev V.I., Kalyuzhny I.L. Hydrological regime and freezing of hummocky bogs on the European North of Russia. *Engineering survey*. 2019;12(9–10):38–48. <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2018-12-9-10-38-48>
8. Пьявченко Н.И. *Бугристые торфяники*. М.: Изд-во Академии наук СССР; 1955. 280 с.
9. Новиков С.М. (Ред.). *Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири*. СПб: ВВМ; 2009. 535 с.

10. Морозов А.П., Москвин Ю.П. Изменения в водно-тепловом режиме многолетнемерзлых болот в Западной Сибири в условиях потепления климата. *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 2025;16(1):49–53. <https://doi.org/10.18822/edgcc635183>  
Morozov A.P., Moskvin Yu.P. Changes in the water-thermal regime of permafrost swamps in Western Siberia in response to climate warming. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2025;16(1):49–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.18822/edgcc635183>
11. Анисимов О.А., Лавров С.А., Жирков А.Ф., Каверин Д.А. Модельная ассимиляция и реанализ геокриологических данных: постановка задачи и валидация модели для Европейского Севера и Восточной Сибири. *Метеорология и гидрология*. 2020;(4):85–94.  
Anisimov O.A., Lavrov S.A., Zhirkov A.F., Kaverin D.A. Permafrost data assimilation and reanalysis: computational setup and model validation for Northern European Russia and Eastern Siberia. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020;(4):85–94. <https://doi.org/10.3103/S106837392004007X>
12. Westermann S., Ingeman-Nielsen T., Scheer J., Aalstad K., Aga J., Chaudhary N., Etzelmüller B., Filhol S., Kääb A., Renette C., Schmidt L.S., Schuler T.V., Zweigel R.B., Martin L., Morard S., Ben-Asher M., Angelopoulos M., Boike J., Groenke B., Miesner F., Nitzbon J., Overduin P., Stuenzi S.M., Langer M. The CryoGrid community model (version 1.0) — a multi-physics toolbox for climate-driven simulations in the terrestrial cryosphere. *Geosci Model Dev*. 2023;16(9):2607–47. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-2607-2023>