



## ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ ДЛЯ РАСЧЁТА ВОДНО-ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА БОЛОТ КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

✉ Морозов А.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ФГБУ «АНИИ», Санкт-Петербург, Россия

✉ antonmorozov43@yandex.ru

В исследовании представлен методологический переход от эмпирических моделей к физически обоснованным для оценки динамики многолетнемёрзлых болот Западной Сибири. Эмпирические подходы, разработанные в эпоху относительно стационарного климата (до 80-х гг XX века) теряют адекватность в условиях современного изменения климата. В качестве решения предложено использование адаптированной под болота динамической модели многолетней мерзлоты (CryoGrid community model). Верификация показала высокую точность модели по основным элементам водно-теплого режима (температура торфяной залежи, мощность сезонно-талого слоя, уровни надмерзлотных вод). Данный подход позволяет обеспечить достоверный анализ динамики многолетнемёрзлых болот и позволяет создать основу для построения прогнозов, необходимых для оценки экономических и экологических рисков и адаптации.

Ключевые слова: *многолетнемёрзлые болота, Западная Сибирь, CryoGrid community model, водно-тепловой режим, торфяная залежь*

Многолетнемёрзлые болота Западной Сибири (полигональные на севере и бугристые на юге), занимающие около 30% территории региона, являются важным компонентом климатической системы. Уникальные теплофизические свойства торфяных залежей болот обуславливают специфический водно-тепловой режим, требующий отдельного изучения.

Исторически динамика болот оценивалась с помощью эмпирических регрессионных моделей, выведенных для стационарного гидрологического и климатического режима. Таким путём пошли в Государственном гидрологическом институте (ГГИ), где были обобщены данные масштабных экспедиционных наблюдений 1973-1992 гг [Новиков и др., 2009]. В современных нестационарных климатических условиях применение эмпирических моделей приводит к значительным ошибкам, так как установленные статистические связи нарушаются.

Альтернативой являются физически обоснованные модели, лишенные перечисленных недостатков за счёт использования инвариантных к изменяющимся внешним условиям фундаментальных уравнений физики. Специализированных моделей многолетнемёрзлых болот нет, существует три варианта создания такой модели: написание модели мёрзлых болот «с нуля», модификация модели многолетнемёрзлых грунтов под болота (торфяную залежь болот) и модификация модели болот для криолитозоны.

В этой работе был использован второй вариант с адаптацией физически обоснованной, открытой для использования модели многолетней мерзлоты CryoGrid community model [Westermann и др., 2023] под моделирование многолетнемёрзлых болот. В основе модели лежит уравнение теплопроводности, решаемое с применением энтальпийного подхода, процессы влагопереноса описываются уравнением Ричардса. Модель была настроена под торфяную залежь болот; кроме того, добавлен гидрологический модуль, разработанный в ГГИ [Лавров, Анисимов, 2011], описывающий гидрологические процессы на болотах.

Модифицированная модель была верифицирована по данным экспедиционных наблюдений ГГИ, с использованием данных гидрологических, теплобалансовых и метеорологических наблюдений. Оценка точности воспроизведения водно-теплового режима болот криолитозоны Западной Сибири была выполнена по трём ключевым элементам: температуре торфяной залежи, мощности сезонно-талого слоя (СТС) и уровню надмерзлотных вод. Стандартная ошибка расчётов по 30 наборам данных составила 1,2 °C по температуре торфяной залежи на глубине 20 см, 5,7 см по мощности СТС и 9,7 см по уровню надмерзлотных вод.

Рисунок 1 иллюстрирует пример способности такой модели достоверно описать процессы теплопереноса и влагопереноса в торфяной залежи характерных для данного региона мёрзлых болот.

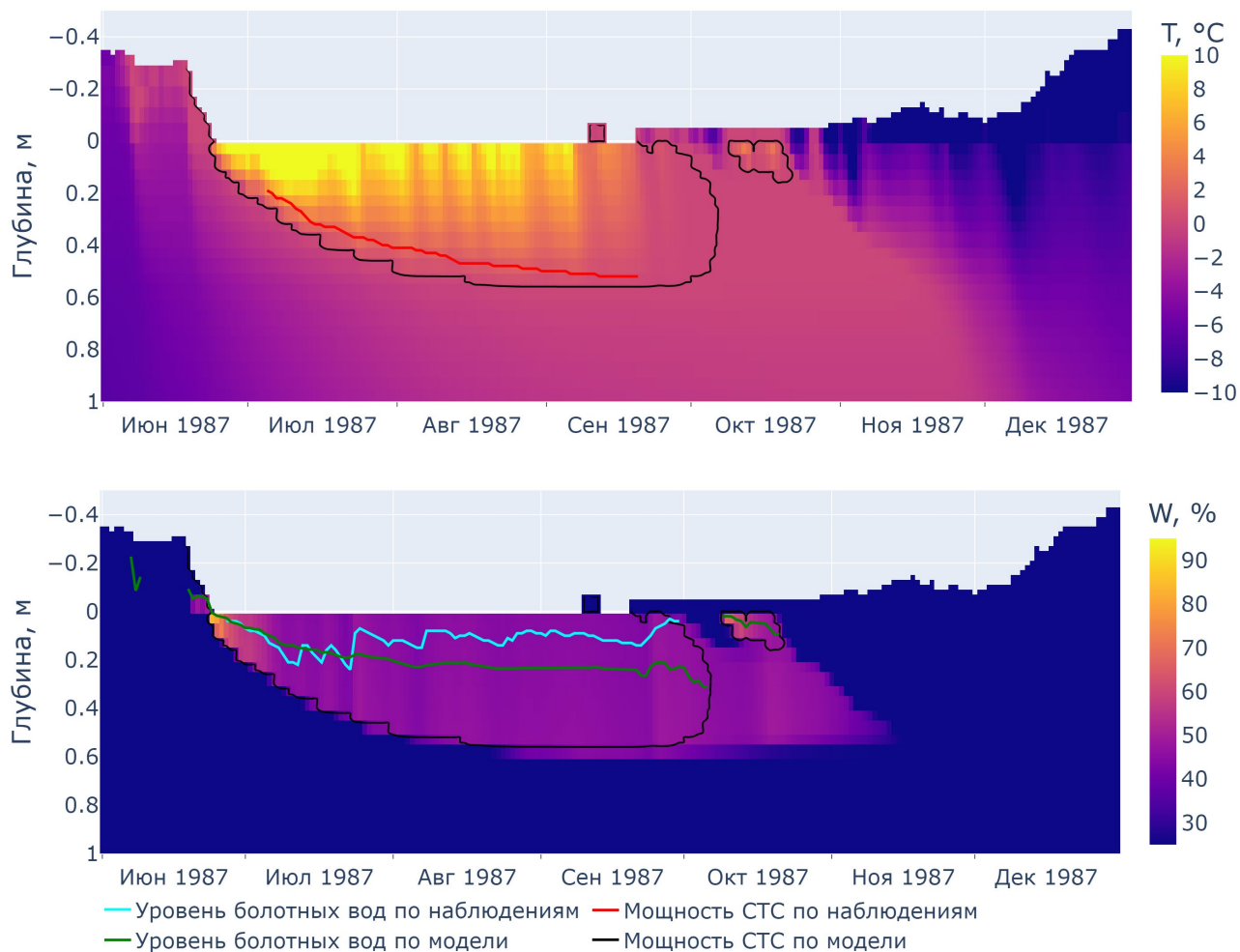


Рис. 1. Динамика температуры (Т), мощности СТС и влажности торфяной залежи (W), рассчитанная по модели и по данным наблюдений (Новопортовский болотный стационар (юг полуострова Ямал (67,79 °с.ш., 72,70° в.д.), зона полигональных болот, июнь-декабрь 1987 года).

На рисунке 1 можно отметить все этапы формирования и исчезновения сезонно-талого слоя, начиная со схода снежного покрова, проникновению тепла в глубину и заканчивая замерзанием торфяной залежи. Также этот пример иллюстрирует сезонные особенности динамики влаги в торфяной залежи и колебания уровня болотных вод, которые связаны с оттаиванием снежного покрова, выпадением осадков, испарением и инфильтрацией влаги. Следует отметить, что на настоящий момент более точно удаётся моделировать тепловой режим многолетнемёрзлых болот, по сравнению с гидрологическим режимом.

Таким образом, этой работой показана методологическая и практическая эффективность перехода к физически обоснованному моделированию в условиях

нестационарного климатического и гидрологического режима. Этот подход обеспечивает достоверный анализ динамики многолетнемерзлых болот и позволяет создать основу для построения прогнозов, которые необходимы для оценки экономических и экологических рисков и адаптации.

## ЛИТЕРАТУРА

Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / под ред. С. М. Новиков. СПб: ВВМ, 2009. 536 с.

Лавров С.А., Анисимов О.А. Моделирование гидротермического режима грунтов: описание физически полной динамической модели и сравнение расчетов с наблюдениями // Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем / под ред. Ю. А. Израэль. М.: Планета, 2011. С. 241–255.

Westermann S., Ingeman-Nielsen T., Scheer J. et. al. The CryoGrid community model (version 1.0) – a multi-physics toolbox for climate-driven simulations in the terrestrial cryosphere // Geoscientific Model Development. 2023. Vol. 16. Is. 9. P. 2607–2647. doi: 10.5194/gmd-16-2607-2023

## APPLICATION OF THE DYNAMIC PERMAFROST MODEL FOR MODELING HYDROTHERMAL REGIME OF SWAMPS IN THE WEST SIBERIAN PERMAFROST ZONE UNDER CLIMATE CHANGE

Morozov A.P.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Hydrological Institute, St.Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Arctic and Antarctic Research Institute, St.Petersburg, Russia

The research presents a methodological transition from empirical models to physically based ones for assessing the dynamics of permafrost swamps in Western Siberia. Empirical approaches developed in the era of relatively stationary climate (before the 80s of the 20<sup>th</sup> century) are losing their relevance in the conditions of modern climate change. The dynamic permafrost model (CryoGrid community model) adapted for swamps is proposed as a solution. The verification showed high accuracy of the model in terms of the main elements of the water-thermal regime (temperature of the peat deposit, active layer thickness, suprapermfrost water levels). This approach allows for a reliable analysis of the dynamics of permafrost swamps and provides a basis for making forecasts that necessary for assessing economic and environmental risks and for adaptation.

Keywords: *permafrost swamps, Western Siberia, CryoGrid community model, water-thermal regime, peat deposit*

## REFERENCES:

Hydrology of wetlands of the permafrost zone of Western Siberia/ edited by Novikov S.M. Saint-Petersburg: VVM, 2009. 536 p. (in Russian).

Lavrov S.A., Anisimov O.A. Modeling of hydrothermal regime of soils: description of dynamical model and comparison of calculation results with observations / edited by Izrael Yu.A. M.: Planeta, 2011. P. 241–255. (in Russian).

Westermann S., Ingeman-Nielsen T., Scheer J. et. al. The CryoGrid community model (version 1.0) – a multi-physics toolbox for climate-driven simulations in the terrestrial cryosphere // Geoscientific Model Development. 2023. Vol. 16. Is. 9. P. 2607–2647. doi: 10.5194/gmd-16-2607-2023