



## ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ РЕАНАЛИЗ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

✉ Анисимов О.А.<sup>1</sup>, Морозов А.П.<sup>1</sup>

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

✉ [anisimov.travel@gmail.com](mailto:anisimov.travel@gmail.com)

Разработанная в Государственном гидрологическом институте динамическая модель гидротермического режима многолетнемерзлых грунтов была применена для реанализа температуры и мощности сезонно-талого слоя криолитозоны в исторический период 1980-2024 гг. Построенные серии цифровых карт позволили получить детальную информацию о пространственно-временной структуре изменений ММГ за последние десятилетия.

Ключевые слова: *многолетнемерзлые грунты, моделирование, изменение климата, реанализ*

Мощность сезонно-талого слоя (СТС) отражает состояние многолетнемерзлых грунтов (ММГ) и испытывает колебания от года к году в зависимости от климатических условий. Ежегодно публикуемые в Докладах Росгидромета сведения о ее длительных изменениях и особенностях последних лет основаны на данных измерений этой величины, получаемых по стандартизированной методике в рамках Международной программы мониторинга CALM (Circum Polar Active-Layer Monitoring). На территории криолитозоны РФ в разное время было создано более 60 площадок CALM, однако лишь малая часть из них обладает длительными рядами наблюдений.

Важно отметить, что эти измерения носят негосударственный характер и осуществляются в рамках отдельных научных проектов, выполняемых в инициативном порядке, главным образом, силами специалистов института Криосферы Земли РАН, института Мерзлотоведения СО РАН при участии исследователей из иных научных учреждений. Одним из важных условий участия в проекте CALM является обеспечение свободного доступа всех заинтересованных потребителей к получаемым данным. До недавнего времени данные по всем странам депонировались и ежегодно обновлялись на информационном портале проекта, размещенном на сервере университета Дж. Вашингтона в США (<https://www2.gwu.edu/~calm/>). Изменившиеся геополитические реалии нарушили эту хорошо работающую систему. Усугубило ситуацию и то, что в мае 2024 г. международная ассоциация мерзлотоведения приняла политически мотивированное решение о приостановке членства России. Закономерным ответом стало прекращение обмена данными о динамике СТС с зарубежными коллегами. В какой-то мере это затронуло и доступ к данным российских пользователей.

Среди российских участников, продолжающих в настоящее время измерения на площадках CALM, передача данных в общее пользование не регламентирована какими-либо условиями и осуществляется в порядке личной инициативы и неофициальных договоренностей. Правовой статус этих данных и вопросы правообладания никогда не обсуждались. В 2007 году был создан русскоязычный информационный портал о вечной мерзлоте [permafrost.su](http://permafrost.su). По настоящее время он является единственным порталом, на котором собраны данные всех когда-либо проводившихся в России измерений на площадках CALM. В ежегодных Докладах Росгидромета проводится анализ поступивших данных, оцениваются длительные тренды и обсуждаются особенности отдельных лет. С учетом отмеченных обстоятельств, все потенциальные пользователи этих данных должны принимать во внимание, что Росгидромет не может нести ответственность за полноту, качество, и соответствие единым инструментальным и методическим принципам

проведенных измерений мощности СТС на различных наблюдательных площадках CALM в пределах криолитозоны России.

Альтернативным источником данных, который лишен указанных недостатков, могут стать измерения, проводимые Росгидрометом на собственной мониторинговой сети. Создание такой сети началось в 2024 г. после того как в декабре 2023 года Правительством РФ было принято постановление "О создании подсистемы государственного фонового мониторинга состояния многолетней (вечной) мерзлоты". Оператором, осуществляющим ее построение, (ААНИИ Росгидромета), был разработан Руководящий документ, в котором сформулированы требования к пунктам наблюдений и дано их исчерпывающее техническое описание. В частности, в нем указано, что пункты наблюдений должны располагаться вблизи действующих метеостанций Росгидромета на удалении от них не более чем на 10 км и на них не должно быть таликов и криопэгов. Планируется создание сети из 140 термометрических скважин глубиной 25,2 метров, по состоянию на конец 2025 года организованы и действуют более 70 скважин.

По мере накопления данных различных видов наблюдений за состоянием ММГ с неизбежностью возникает задача их обобщения. Она состоит в том, чтобы провести анализ почвенных, надпочвенных (снег, растительность), топографических, климатических и иных влияющих факторов, сопоставить их с точечными мерзлотными измерениями и построить пространственно-временной континуум двух главных параметров ММГ, - среднегодовой температуры и мощности СТС для всей криолитозоны. Можно провести параллель с метеорологией, где до недавнего времени серьезные проблемы были связаны с заполнением пропусков и обобщением данных неравномерной и редкой сети наблюдений. Сейчас они во многом преодолены благодаря развитию реанализа, который представляет собой двушаговой процесс. На первом шаге, называемом ассимиляцией данных, проводится валидация метеорологической модели по всем имеющимся для фиксированного интервала времени измерениям. На втором шаге проводится собственно реанализ, т.е. по откалиброванной модели рассчитываются исследуемые параметры в узлах сетки, охватывающей исследуемую область, при этом учитываются все главные влияющие факторы. Современные продукты атмосферного реанализа обеспечивают в режиме близком к реальному времени информацию о таких параметрах, как температура приземного слоя воздуха и поверхности почвы, осадки, ветер, давление и ряд других с суточной дискретностью для всей территории суши.

Ключевую роль в реанализе играет моделирование. Математический формализм всех моделей ММГ основан на решении задачи Стефана, постановка которой описана во многих публикациях. Исчерпывающая обзорная информация приведена в [Анисимов и др., 2012]. Особенностью задачи является наличие подвижных границ раздела мерзлого и талого грунта, на которых происходят фазовые переходы влаги.

Выбор модели для реанализа лимитирован наличием данных, необходимых для ее валидации. Накопленные к настоящему времени наблюдения дают возможность проводить реанализ на основе динамических моделей ММГ. В отличие от полуэмпирических, такие модели основаны на фундаментальных уравнениях тепло- и влагопереноса и дают исчерпывающую информацию об изменениях во времени и по глубине параметров физического состояния ММГ. Динамические модели требуют лишь минимальной валидации, под которой понимается уточнение значений входящих в модель почвенных, растительных и иных влияющих параметров так, чтобы максимально приблизить результаты расчета к имеющимся наблюдениям СТС и температуры грунта. Валидация проводится с дифференциацией по мерзлотным и растительным зонам, почвенным, ландшафтным и климатическим условиям. В каждом случае подбираются типичные для заданных условий значения параметров, при которых достигаются минимальные различия между расчетами и наблюдениями.

Динамические модели разной сложности были разработаны в Государственном гидрологическом институте (ГГИ), в Главной геофизической обсерватории, в Институте

вычислительной математики РАН и в Институте физики атмосферы. Аналогичные исследования проводились в США, прежде всего в университете Фэрбенкса, Аляска и в университете Колорадо. Зарубежным научным сообществом недавно была разработана модель Cryogrid Community Model, представляющая значительный интерес в плане использования для реанализа. Все эти модели различаются, главным образом, методом численного решения уравнения теплопроводности. В данной работе была использована динамическая модель ГГИ. Она наиболее полно учитывает водный баланс верхнего слоя почвы, что позволяет корректировать на каждом расчетном шаге зависящие от влажности теплофизические характеристики среды. Не воспроизводя весь математический формализм, отметим лишь главные особенности модели.

Основу составляют уравнение теплового баланса подстилающей поверхности, уравнение переноса тепла в слое снега и почве и уравнение баланса влаги. Перенос тепла и влаги в грунтовой толще описывается следующим образом.

$$c_e \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho_w L \frac{\partial W}{\partial t} \vartheta \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \psi}{\partial z} - K \right) \quad (2)$$

где 
$$c_e = \rho_w c_w + \rho_i c_i + \rho_s c_s (1 - P) + \rho_w L \frac{\partial W_l(T)}{\partial T} \vartheta; \quad (3)$$

$$\vartheta = \begin{cases} 0; & \text{при } T \geq 0 \\ 0; & \text{при } T < 0 \text{ и } W \leq W_l(T) \\ 1; & \text{при } T < 0 \text{ и } W > W_l(T) \end{cases}$$

В этих уравнениях  $L$  - теплота фазового перехода вода – лед (дж/г);  $T$  - температура почвы ( $^{\circ}\text{C}$ );  $W, P$  –объемная влажность и пористость почвы (доли объема);  $W_l(T)$  – содержание незамёрзшей влаги в почве, зависящее от температуры ( $\text{г/м}^3$ );  $\psi$  - капиллярно-сорбционный потенциал почвенной влаги (м водного столба);  $K, \lambda$  – коэффициенты влагопроводности (м/с) и теплопроводности ( $\text{Вт}/(\text{м} \times ^{\circ}\text{C})$ ) почвы;  $c_e$  - эффективная теплоемкость почвы ( $\text{Дж}/(\text{г} \times ^{\circ}\text{C})$ );  $c_w, c_i, c_s$  - удельные теплоемкости воды, льда и скелета почвы ( $\text{Дж}/(\text{г} \times ^{\circ}\text{C})$ );  $\rho_w, \rho_i, \rho_s$  - соответственно их плотности ( $\text{г/м}^3$ );  $\vartheta$  - безразмерный бинарный коэффициент;  $t, z$  - время (с) и вертикальная координата (м), причем поверхность почвы совмещена с уровнем  $z = 0$ , а ось  $z$  направлена вниз.

Отличие уравнения (1) от традиционного уравнения теплопроводности в том, что оно учитывает содержание незамёрзшей влаги в мерзлом грунте как функцию температуры. Уравнение (2) описывает миграцию влаги при промерзании грунтов. На входе модели задаются суточные значения температуры воздуха, осадков, скорости ветра, влажности воздуха и приходящей солнечной радиации.

В настоящее время модель ГГИ была откалибрована с использованием данных 10 площадок измерений температуры грунта в криолитозоне Восточной Сибири и 25 площадок на севере ЕТР. В совокупности они представляют широкий спектр ландшафтно-климатических, почвенных и гидрологических условий. По ней проведены расчеты температуры грунта и мощности СТС за исторический период 1980-2024 гг. Построенные серии цифровых карт позволили получить детальную информацию о пространственно-временной структуре изменений ММГ за последние десятилетия.

## **ЛИТЕРАТУРА**

*Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А., Малкова Г.В., Павлов А.В., Романовский В.Е., Стрелецкий Д.А., Холодов А.Л., Шикломанов Н.И.* Континентальная многолетняя мерзлота, В кн. Методы изучения последствий изменений климата для природных систем., С.М. Семенов, (ред.), 2012: М. изд. ВНИИГМИ. с. 268-328.

## **PERMAFROST REANALYSIS: CURRENT STATE AND PERSPECTIVE OF FUTURE DEVELOPMENTS**

*Anisimov O.A, Morozov A.P.*

State hydrological Institute, St.Petersburg, Russia

Dynamical permafrost of the State Hydrological Institute has been used for the reanalysis of the ground temperature and active-layer thickness in the historical period 1980-2024. Digital maps of these parameters provide detailed information about the spatial and temporal variations of permafrost properties in the past decades

Keywords: *permafrost, modeling, climate change, reanalysis*

## **REFERENCES:**

*Anisimov, O.A., Anokhin Y.A., Lavrov S.A., Malkova G.V., Pavlov A.V., Romanovsky V.E., Streletskiy D.A., Kholodov A.L., Shiklomanov N.I.* Terrestrial permafrost, in book: Methods for evaluation of the climate change impacts on the environmental systems., S.M. Semenov, Editor: Moscow. 2012. P. 268-328.