

УДК 551.345.2

EDN [NQWJBE](#)



## Совместное использование результатов модельного реанализа и наземных наблюдений для определения температуры многолетнемерзлых пород на примере Западного Ямала

К.А. Никитин<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Россия

\*E-mail: [nikitin.kirill@yandex.ru](mailto:nikitin.kirill@yandex.ru)

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию температуры многолетнемерзлых пород Западного Ямала на основе модельного подхода, связанного с климатическим реанализом ERA5-Land. Показано, что данные реанализа не могут быть полностью использованы для нахождения среднегодовой температуры пород в 1980-2020 гг. Применение в расчетной схеме опубликованных результатов наземных наблюдений позволяет воспроизвести многолетний ход среднегодовой температуры мерзлых пород.

**Ключевые слова:** реанализ, температура, многолетнемерзлые породы, Западный Ямал.

## Combined use of model reanalysis results and field observations to determine the permafrost temperature by the example of Western Yamal

K.A. Nikitin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

\*E-mail: [nikitin.kirill@yandex.ru](mailto:nikitin.kirill@yandex.ru)

**Abstract.** The article is devoted to the study of permafrost temperature on the Western Yamal based on a model approach associated with the ERA5-Land climate reanalysis. It is shown that reanalysis data cannot be fully used to find the mean annual ground temperature in 1980-2020. The use of published results of field observations in the calculation scheme makes it possible to reproduce the long-term variation of mean annual ground temperature.

**Keywords:** reanalysis, temperature, permafrost, Western Yamal.

## 1. Введение

Многолетнемерзлые породы (ММП) – ключевой компонент криосферы, определяющий динамику многих глобальных природных процессов [11]. Исследование таких характеристик ММП, как распространение, строение, температура, глубина сезонного оттаивания, на глобальном и региональном уровнях сопряжено с рядом трудностей, одной из которых является неравномерная по плотности сеть наблюдательных участков [12]. Экстраполяция результатов точечных наблюдений за температурой верхних горизонтов пород в пределах крупных регионов имеет ряд ограничений, связанных с количеством, расположением и глубиной наблюдательных скважин, продолжительностью и программой наблюдений, пространственной неоднородностью природных условий, определяющих температуру ММП, методом экстраполяции.

Одним из методов при изучении ММП в глобальном и региональном масштабах является применение модельных подходов [14, 19]. Определение характеристик многолетнемерзлых пород происходит путем как численного решения физически обоснованной тепловой задачи кондуктивного теплообмена при заданных краевых условиях, теплообменных характеристиках грунта в талом и мерзлом состояниях [22], так и использования эмпирических и статистических зависимостей между метеорологическими параметрами и ММП [10].

Последний метод получил широкое распространение при исследовании термического режима пород и оценке реакции ММП на ожидаемые климатические изменения в пределах крупных физико-географических регионов [20, 21]. Входные данные в модели являются по типу преимущественно площадными, то есть содержат информацию о климате, рельефе, наземных покровах, почве, гидрологии в значении пикселей или узлов регулярной сетки.

Основные ограничения, связанные с использованием этого подхода, заключаются в наличии, пространственном разрешении и точности входных данных, параметризации модели для количественного определения влияния природных факторов на ММП. Кроме этого возникает сложность сопоставления результатов моделирования с фактическими данными с стационаров. Это сравнение может быть реализовано, если точечные

наблюдения проводились в условиях, типичных для конкретного региона, то есть являются репрезентативными.

Одним из способов сокращения указанных ограничений является применение комплексной методики, позволяющей оценить точность входных данных, целенаправленно отказаться от некоторых из них, воспользовавшись результатами исследований на наблюдательных пунктах, решить задачу промерзания-протаивания и оценить полученные результаты.

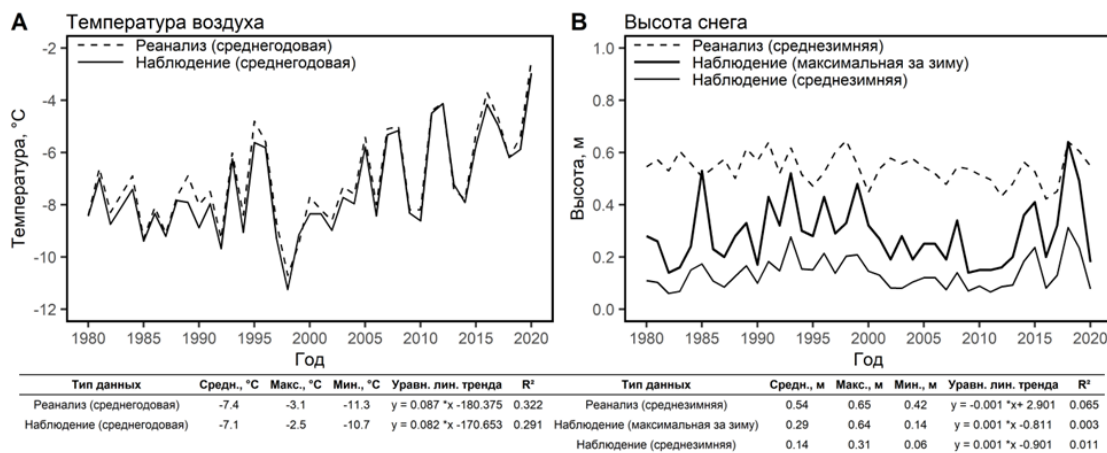
## 2. Цель исследования

Целью настоящей работы является воспроизведение среднегодовой температуры ММП на основе модельного подхода, сочетающего в себе результаты реанализа и наземных наблюдений. Задача решается для Западного Ямала, отличающегося относительно однородными природными условиями, что было определено по результатам мерзлотной съемки севера Западно-Сибирской плиты [5].

## 3. Методы и материалы исследования

В качестве результатов реанализа использованы наборы данных ERA5-Land (European ReAnalysis), разработанные Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF) и предоставляемые Службой по изменению климата Copernicus (Copernicus Climate Change Service – C3S) [13, 16]. Основное преимущество выбранного продукта – высокое пространственное разрешение 9 км по сравнению с более ранними версиями ERA5 (31 км) и ERA-Interim (80 км). Взяты среднемесячные значения температуры приземного воздуха, высоты и плотности снежного покрова в 1980-2020 гг. Для каждого месяца рассчитаны средние значения этих параметров для ячеек из набора данных, расположенных в пределах Западного Ямала. Дополнительно найдены среднегодовые значения температуры воздуха и среднезимние значения высоты снега.

Данные реанализа сравниваются с результатами многолетних метеорологических наблюдений, проведенных на метеостанции Марре-Сале [4]. Итоги сравнения наборов данных представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Сравнение результатов реанализа ERA5-Land и наблюдений на метеостанции Марре-Сале.

Результаты модельного реанализа и наземных метеорологических наблюдений за температурой воздуха во многом совпадают. Средние значения в 1980-2020 гг. составляют -7,4 и -7,1 °C, тренд изменения 0,9 и 0,8 °C/десятилетие соответственно. Среднеквадратичное отклонение равно 0,43 °C.

Разница между значениями высоты снега более существенна. Для сравнения дополнительно добавлен график его максимальной высоты, фиксируемой на метеостанции Марре-Сале. Значения среднезимней высоты снега, полученные как реанализом, так и наземными наблюдениями, за рассматриваемый период отличаются более, чем в 3 раза. Максимальная высота снега оказалась ниже результатов реанализа более, чем в 1,5 раза. Таким образом, высота снега, полученная модельным реанализом, является завышенной по сравнению с наблюдениями. В дальнейших расчетах используется высота снега, определенная непосредственно на метеоплощадке.

В свободном доступе отсутствуют итоги долговременных измерений плотности снежного покрова на метеостанции. Поэтому данные о плотности снега, полученные реанализом, сравниваются с опубликованными результатами ее кратковременных измерений на Западном Ямале [6, 9]. Данные, полученные реанализом, полностью попадают в диапазон значений плотности, определенной наземными наблюдениями.

Для нахождения среднегодовой температуры ММП решается задача промерзания-протаивания на основе методики, устанавливающей зависимость между

уровнем теплооборотов в породах, климатическими характеристиками, теплофизическими свойствами грунтов и естественных покровов [3, 7]. Расчет выполняется для каждого года отдельно.

Задача решается для территорий, на которых сезонно-талый слой сложен песчано-супесчаными отложениями. Растительность отсутствует или представлена редким травяно-мохово-лишайниковым покровом, свойствами которого можно пренебречь. Ландшафтно-геоботанические и дистанционные исследования в районе метеостанции Марре-Сале показали [17], что такие дренированные участки имеют широкое распространение и занимают значительные территории плоских и слабоволнистых водоразделов, межозерных и межхасырейных перемычек.

Теплопроводность и теплоемкость пород получены для каждого года расчетным методом на основе опубликованных результатов изучения криогенной толщи на территории Бованенковского НГКМ [1, 2, 8]. Средняя весовая влажность пород сезонно-талого слоя определялась в конце теплого периода в рамках программы многолетнего мониторинга Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в районе Марре-Сале [18]. По результатам исследований установлено, что на фоне потепления климата в отдельных дренированных ландшафтах содержание влаги в сезонно-талом слое почти не изменяется или медленно сокращается. Используя опубликованные закономерности изменения показателя [18], в данной работе учитывается постепенное сокращение влажности пород сезонно-талого слоя в 1980-2020 гг.

#### **4. Полученные результаты**

Результаты расчетов сравниваются с опубликованными данными наблюдений Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН за температурой ММП в районе метеостанции Марре-Сале, которые представлены в виде средней температуры для каждого десятилетия в период 1980-2020 гг. [15]. Рассчитанные средние десятилетние значения оказываются на 0,1-0,3 °С ниже, чем инструментально полученные при термометрических наблюдениях в скважинах.

#### **5. Выводы**

Основные выводы проведенной работы заключаются в следующем:

1. Результаты модельного реанализа для Западного Ямала не могут быть полностью использованы для решения задачи промерзания-оттаивания. Рассчитанные и наблюдаемые значения приземной температуры воздуха во многом совпадают. Высота снежного покрова, полученная модельным реанализом, является завышенной по сравнению с наблюдениями.

2. Рассчитанные значения среднегодовой температуры ММП в 1980-2020 гг., приведенные к средним за десятилетия, отличаются от инструментально полученных в термометрических скважинах на 0,1-0,3 °С.

3. Совместное использование результатов модельного реанализа и наземных наблюдений для оценки изменений температуры ММП оправданно, если точность модельных данных может быть оценена по ближайшей метеостанции, являющейся репрезентативной для конкретного региона. Важное значение приобретают стационарные наземные наблюдения, использование результатов которых в расчетной схеме позволяет воспроизвести многолетний ход температуры ММП в пределах крупных физико-географических регионов.

### Список литературы

1. Бадю Ю.Б., Подборный Е.Е. Состав и водно-физические свойства грунтов // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: Монография. В 3 т. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. – М.: Газпром экспо, 2013. – 210-228 с.
2. Бадю Ю.Б., Подборный Е.Е. Теплофизические свойства грунтов // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: Монография. В 3 т. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. – М.: Газпром экспо, 2013. – 229-242 с.
3. Булдович С.Н. Методика приближенной оценки и прогнозирования геокриологических характеристик – среднегодовой температуры и глубины сезонного оттаивания (промерзания) пород // Основы геокриологии. Ч. 6. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – 140-170 с.
4. Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). [meteo.ru/data](http://meteo.ru/data). Дата обращения 15.02.2023.

5. Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты / Трофимов В.Т., Бадю Ю.Б., Васильчук Ю.К. и др. – М.: Наука, 1987. – 25-99 с.
6. Климат территории нефтегазовых месторождений на полуостровах Тазовский и Ямал. Справочник специалиста / Под ред. Швер Ц.А. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 166-167 с.
7. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. Учебное пособие. Издание 2-е. / Под ред. Гарагули Л.С., Брушкова А.В. – М.: Геоинфо, 2016. – 87-106 с.
8. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. – Новосибирск: Наука, 1979. – 176-188 с.
9. Трофимов В.Т., Бадю Ю.Б., Кудряшов В.Г. и др. Полуостров Ямал (инженерно-геологический очерк). – М.: Изд-во Московского университета, 1975. – 13-26 с.
10. Aalto J., Karjalainen O., Hjort J. et al. Statistical forecasting of current and future circum-Arctic ground temperatures and active layer thickness // *Geophysical Research Letters*. – 2018. – Vol. 45(10). – P. 4889-4898.
11. AMAP Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Norway, 2022. 148 p.
12. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzel J. et al. Permafrost is warming at a global scale // *Nature communications*. – 2019. – Vol. 10(1), 264.
13. ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). [cds.climate.copernicus.eu](https://cds.climate.copernicus.eu). Дата обращения 15.07.2023.
14. Gruber S. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation // *The Cryosphere*. – 2012. – Vol. 6. – P. 221-233.
15. Malkova G.V., Drozdov D.S., Vasiliev A.A. et al. Spatial and temporal variability of permafrost in the western part of the Russian Arctic // *Energies*. – 2022. – Vol. 15(7), 2311.
16. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // *Earth Syst. Sci. Data*. – 2021. – Vol. 13(9). – P. 4349-4383.

17. Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskaya I.D. et al. Methane content and emission in the permafrost landscapes of Western Yamal, Russian Arctic // *Geosciences*. – 2020. – Vol. 10(10), 412.
18. Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskiy D.A. et al. Localized vegetation, soil moisture, and ice content offset permafrost degradation under climate warming // *Geosciences*. – 2023. – Vol. 13(5), 129.
19. Obu J., Westermann S., Bartsch A. et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000-2016 at 1 km<sup>2</sup> scale // *Earth-Science Reviews*. – 2019. – Vol. 193. – P. 299-316.
20. Tao J., Koster R.D., Reichle R.H. et al. Permafrost variability over the Northern Hemisphere based on the MERRA-2 reanalysis // *The Cryosphere*. – 2019. – Vol. 13(8). – P. 2087-2110.
21. Westermann S., Østby T.I., Gislås K. et al. A ground temperature map of the North Atlantic permafrost region based on remote sensing and reanalysis data // *The Cryosphere*. – 2015. – Vol. 9. – P. 1303-1319.
22. Westermann S., Schuler T.V., Gislås K. et al. Transient thermal modeling of permafrost conditions in Southern Norway // *The Cryosphere*. – 2013. – Vol. 7. – P. 719-739.