

**О.М. Голозубов, А.В. Козловский, Э.В. Мельник, Я.Э. Мельник, А.Н. Самойлов**

**ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ ИНТЕРПОЛЯЦИИ  
ДЕКАДНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ МЕТОДОМ ОБРАТНОГО  
ВЗВЕШИВАНИЯ ПО РАССТОЯНИЮ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКОЙ  
МНОЖЕСТВЕННЫХ ВРЕМЕННЫХ СРЕЗОВ**

*Настоящее исследование посвящено решению проблемы вычислительной неэффективности при пространственной интерполяции больших массивов декадных метеорологических данных с использованием метода обратного взвешивания по расстоянию. Традиционные подходы, предполагающие последовательную и независимую обработку каждого временного среза, демонстрируют линейный рост времени выполнения и значительное потребление оперативной памяти, что становится критическим барьером для оперативного построения детализированных и географически привязанных растровых полей в формате GeoTIFF. Это существенно ограничивает применение метода в задачах, требующих быстрой обработки многолетних архивов данных. Целью данной работы является разработка и валидация оптимизированной вычислительной схемы, позволяющей радикально сократить временные затраты при сохранении полноты и точности результатов. Ключевая научная новизна предложенного подхода заключается в фундаментальном переосмыслении вычислительного процесса. Вместо многократного повторения идентичных операций, предложена схема, основанная на однократном расчете полного вектора геодезических расстояний от каждой ячейки растра до всех метеостанций. Эта наиболее ресурсоемкая операция выполняется лишь один раз. В дальнейшем, полученный вектор расстояний применяется ко всем временным срезам (декадам) для вычисления интерполированных значений, что устраняет основную вычислительную избыточность и обеспечивает сублинейную зависимость времени обработки от числа декад. Для дальнейшего повышения производительности применяется механизм параллельной обработки на уровне центрального процессора, реализованный посредством динамического разделения растра на независимые вычислительные блоки (батчи). Размер батчей адаптивно регулируется с учетом доступной оперативной памяти, что гарантирует стабильность и масштабируемость решения на системах различной мощности. Апробация метода на реальных метеорологических данных за период 2015-2024 годов продемонстрировала радикальное сокращение времени выполнения. В частности, обработка десяти декадных временных срезов на стандартном ноутбуке занимает менее 3,5 минут, а на серверной платформе – около 3 минут, что представляет собой многократное ускорение по сравнению с традиционными реализациями. Таким образом, разработанное решение делает оперативную обработку больших пространственно-временных метеорологических массивов реальностью для широкого круга исследователей, открывая новые возможности для климатического мониторинга, агрометеорологии и геоинформационного анализа без необходимости привлечения специализированного дорогостоящего оборудования.*

*Метод обратного взвешивания по расстоянию; пространственная интерполяция; векторизация вычислений; параллельная обработка; геодезические расстояния; декадные метеорологические данные; оптимизация производительности.*

**O.M. Golozubov, A.V. Kozlovskiy, E.V. Melnik, Y.E. Melnik, A.N. Samoilov**

**OPTIMIZATION OF THE COMPUTATIONAL SCHEME  
FOR THE INTERPOLATION OF DECADEAL METEOROLOGICAL DATA  
BY INVERSE DISTANCE WEIGHTING WITH PARALLEL PROCESSING  
OF MULTIPLE TIME SLICES**

*The present study is devoted to solving the problem of computational inefficiency in spatial interpolation of large arrays of decadal meteorological data using the inverse distance weighting method. Traditional approaches involving sequential and independent processing of each time slice demonstrate a linear increase in execution time and significant RAM consumption, which becomes a critical barrier to the rapid construction of detailed and geographically linked raster fields in GeoTIFF format. This significantly limits the use of the method in tasks requiring rapid processing of long-term data archives. The purpose of this work is to develop and validate an optimized computational scheme that can radically reduce time costs while maintaining the completeness and accuracy of the results. The key scientific novelty of the*

*proposed approach lies in the fundamental rethinking of the computational process. Instead of repeating identical operations many times, a scheme is proposed based on a single calculation of the full vector of geodetic distances from each grid cell to all weather stations. This most resource-intensive operation is performed only once. Subsequently, the resulting distance vector is applied to all time slices (decades) to calculate the interpolated values, which eliminates the main computational redundancy and ensures a sublinear dependence of processing time on the number of decades. To further improve performance, a parallel processing mechanism is used at the CPU level, implemented by dynamically dividing the raster into independent computing units (batches). The size of the batches is adaptively adjusted taking into account the available RAM, which guarantees the stability and scalability of the solution on systems of various capacities. The testing of the method on real meteorological data for the period 2015-2024 demonstrated a radical reduction in the execution time. In particular, processing ten decade time slices on a standard laptop takes less than 3.5 minutes, and on a server platform it takes about 3 minutes, which represents a multiple acceleration compared to traditional implementations. Thus, the developed solution makes the operational processing of large spatial and temporal meteorological arrays a reality for a wide range of researchers, opening up new opportunities for climate monitoring, agrometeorology and geoinformation analysis without the need for specialized expensive equipment.*

*Inverse distance weighting method; spatial interpolation; vectorization of calculations; parallel processing; geodetic distances; decade-long meteorological data; performance optimization.*

**Введение.** Современный этап развития климатологии, агрометеорологии и геоинформационных технологий характеризуется стремительным ростом объёмов пространственно-временных данных, получаемых с глобальных и региональных сетей метеорологических наблюдений. Декадные ряды метеорологических параметров, представляющие собой усреднённые значения за десятидневные интервалы, составляют фундаментальную основу для построения климатических моделей, оценки сезонных трендов, прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур и оперативного реагирования на экстремальные погодные явления. В условиях изменения климата и увеличения плотности наблюдательных сетей объём таких данных достигает десятков и сотен тысяч записей на один регион, что создаёт серьёзные вызовы для их обработки в разумные сроки [1–3].

Одной из центральных задач при работе с такими массивами является построение непрерывных пространственных полей метеорологических параметров (например, температуры) на регулярной сетке высокого разрешения. Среди множества методов пространственной интерполяции особое место занимает метод обратного взвешивания по расстоянию (Inverse Distance Weighting, IDW), который сохраняет популярность благодаря своей вычислительной простоте, физической интерпретируемости и отсутствию необходимости в сложной статистической калибровке. При правильной реализации он обеспечивает приемлемую точность при умеренных вычислительных затратах, что делает его востребованным в оперативных системах мониторинга и научных исследованиях [4].

Однако при переходе к обработке обширных территорий – например, регионов размером в сотни километров с разрешением 1 угловая секунда, что соответствует сетке в миллионы ячеек – и одновременном учёте множества временных срезов (декад) стандартные программные реализации IDW сталкиваются с критическими ограничениями по производительности. Последовательная интерполяция каждого временного слоя независимо от других приводит к тому, что вычислительное время измеряется часами и сутками даже на современных рабочих станциях. Такие задержки делают невозможным использование результатов в оперативных задачах, где требуется получение готовых растровых карт в течение нескольких минут после поступления новых данных.

Дополнительную сложность вносит необходимость сохранения полного массива выходных значений – не статистических сводок или агрегированных показателей, а именно детализированных растров для каждой декады в географически привязанном формате, пригодном для дальнейшего анализа в геоинформационных системах (ГИС). Это исключает возможность радикального упрощения вычислений за счёт потери информации. При этом аппаратные ограничения – в первую очередь, объём оперативной памяти и пропускная способность процессора – накладывают жёсткие рамки на масштабируемость традиционных подходов [5].

В этих условиях возникает настоятельная потребность в новых вычислительных схемах, которые позволили бы преодолеть указанные барьеры без привлечения специализированного оборудования, такого как графические или нейронные процессоры. Решение должно быть универсальным, воспроизводимым и доступным для широкого круга исследователей и специалистов, работающих на стандартных вычислительных платформах. Особое значение приобретает переосмысление внутренней организации вычислительного процесса: переход от послышной обработки к одновременному учёту всех временных срезов, оптимизация доступа к памяти и эффективное использование параллелизма на уровне центрального процессора.

Настоящая работа посвящена рассмотрению этих актуальных вопросов. В ней последовательно анализируются вызовы, связанные с обработкой больших массивов декадных метеорологических данных, оцениваются ограничения существующих программных решений, предлагается новый подход к организации вычислений, описываются детали его реализации и приводятся результаты экспериментального тестирования на реальных данных. Целью является демонстрация того, что за счёт продуманной схемы вычислений и оптимального использования доступных аппаратных ресурсов возможно достижение качественного скачка в производительности при сохранении полной детализации и точности выходных растров.

**Описание задачи и ожидаемых результатов.** Задача настоящей работы состоит в оптимизации вычислительного процесса пространственной интерполяции метеорологических данных методом обратного взвешивания по расстоянию при одновременной обработке множества последовательных временных срезов. В центре внимания находится вычислительная эффективность – способность получить полный и детализированный результат за время, существенно меньшее, чем при традиционных подходах.

Исходные данные – это дискретные наблюдения параметров с сети метеостанций, организованные в виде временных рядов. Требуется построить непрерывные поля данных параметров на регулярной географической сетке высокого разрешения для каждого из выбранных временных интервалов. Интерполяция должна учитывать сферическую геометрию Земли и использовать геодезические расстояния.

Главное ограничение: выходной результат должен быть полным. Это означает, что для каждого временного среза необходимо сохранить отдельный растровый слой, содержащий значения параметра во всех ячейках сетки, включая области с низкой плотностью наблюдений. Никакие упрощения, сводки или агрегации недопустимы – требуется полный архив растров в географически привязанном формате.

При обработке нескольких временных срезов традиционные методы приводят к неприемлемо высоким временным затратам – от часов до суток. Ожидаемым результатом является радикальное ускорение – сокращение времени выполнения до минут при сохранении всей полноты и детализации выходных данных.

Цель оптимизации – достичь такого уровня производительности, при котором время получения полного набора растровых полей параметров становится пренебрежимо малым по сравнению с временем сбора, подготовки и анализа исходных данных. Научная новизна и практическая ценность предлагаемого подхода заключается в преодолении временных барьеров без потери информации.

**Обзор существующих решений.** Пространственная интерполяция метеорологических данных методом обратного взвешивания по расстоянию широко применяется в климатологии и геоинформатике благодаря своей простоте и интерпретируемости. На протяжении десятилетий разработано множество программных реализаций этого метода, встроенных как в коммерческие геоинформационные системы (ArcGIS, QGIS) [6], так и в специализированные научные пакеты (R, Python, MATLAB) [7–9]. Однако большинство из них ориентировано на обработку единичного временного слоя и не учитывает специфику работы с большими последовательностями временных срезов при сохранении полного массива выходных данных.

В коммерческих ГИС-платформах, таких как ArcGIS Pro, IDW реализован с высокой степенью оптимизации для отдельных растров, однако обработка множества декад требует ручного или скриптового запуска интерполяции для каждого слоя [10]. Это приводит к значительным временным затратам, особенно при высоком разрешении сетки. Кроме того, такие системы часто требуют лицензирования и не всегда обеспечивают гибкость в управлении памятью при пакетной обработке.

В среде открытого программного обеспечения популярны реализации на основе библиотек GDAL и SciPy. Например, в QGIS инструмент «IDW Interpolation» позволяет автоматизировать обработку через модельер или Python-консоль, но при этом каждый временной срез обрабатывается независимо [11]. Аналогично, в Python-пакетах, таких как scikit-learn или rasterio в сочетании с numpy, пользователи могут написать собственные скрипты для циклической интерполяции, однако без специальной оптимизации такие решения демонстрируют линейный рост времени выполнения пропорционально числу декад.

Существуют и специализированные климатические платформы, такие как Climate Data Operators (CDO) или xESMF, которые поддерживают пакетную обработку сеточных данных. Однако они ориентированы в первую очередь на работу с регулярными сетками (например, реанализами ERA5), а не на интерполяцию неравномерно распределённых точечных наблюдений. Применение IDW в таких системах либо отсутствует, либо реализовано как вспомогательная функция с ограниченной производительностью [12].

Более продвинутые подходы, основанные на параллельных вычислениях, используют GPU (например, через библиотеки CuPy или TensorFlow) [13] или распределённые системы (Dask, Spark) [14]. Такие решения действительно ускоряют интерполяцию, но требуют наличия соответствующего оборудования и существенно усложняют развёртывание. Кроме того, при работе с геодезическими расстояниями возникают сложности с точным переносом вычислений на GPU, а также с сохранением совместимости выходных GeoTIFF-файлов.

Наконец, научные публикации предлагают различные модификации IDW – адаптивный выбор степени расстояния, ограничение радиуса влияния, комбинирование с кригингом – но практически все они сосредоточены на улучшении точности, а не на радикальном сокращении времени выполнения при сохранении полного массива данных. Известные решения не решают задачу одновременной интерполяции по всем временным срезам с однократным вычислением расстояний и векторным применением весов – подход, который мог бы устранить основную избыточность вычислений [15].

Получается, что несмотря на обилие инструментов, отсутствует универсальное, эффективное и доступное решение, способное обработать несколько декадных срезов за минуты на стандартном оборудовании при сохранении полного набора выходных растров.

**Предлагаемое решение.** Для преодоления ограничений существующих подходов предлагается новая схема вычислений, ориентированная на одновременную интерполяцию по всем временным срезам при сохранении полного массива выходных данных. В отличие от традиционной схемы, где каждый декадный слой обрабатывается независимо и последовательно, разработанный метод устраняет основную вычислительную избыточность – многократное повторение одних и тех же операций по расчёту геодезических расстояний.

Первый способ сократить время вычислений – это использование векторизации вычислений. Идея заключается в том, чтобы, где это возможно, применить повторяемую операцию один раз на весь набор данных [16, 17]. Одной из частей таких вычислений стали геодезические расстояния от каждой ячейки растра до всех метеостанций. Они вычисляются один раз при расчёте интерполяции для каждой клетки. Далее полученный массив расстояний применяется векторно ко всем выбранным декадам одновременно, что позволяет за одну операцию получить полные значения параметра для заданной координаты за весь анализируемый период.

Такое переосмысление структуры вычислений даёт возможность радикально сократить общее время выполнения. Вместо линейного роста трудоёмкости пропорционально числу декад достигается сублинейная зависимость, где основная нагрузка приходится на однократное вычисление расстояний, а последующая интерполяция по времени выполняется с минимальными затратами.

Дополнительно реализуется параллельная обработка. Существуют методы, позволяющие производить такие расчеты на нескольких устройствах [18, 19], однако в рассматриваемом случае это не является оптимальным решением, так как все данные находятся на одном носителе информации. В данной ситуации гораздо эффективнее параллелизм на уровне центрального процессора с динамическим разбиением растра на незави-

симые блоки [20]. Это устраняет недостаток, связанный с передачей информации по сети, что может значительно замедлять вычисления. При таком методе расчетов каждый блок обрабатывается в отдельном вычислительном потоке, что обеспечивает эффективное использование всех доступных ядер процессора без необходимости в специализированном оборудовании. Управление памятью осуществляется автоматически: размер блока подбирается с учётом доступного объёма оперативной памяти, что гарантирует стабильную работу даже на системах среднего уровня. На рис. 1 визуальным образом представлено изменение схемы расчётов для наглядной демонстрации ускорения вычислений.

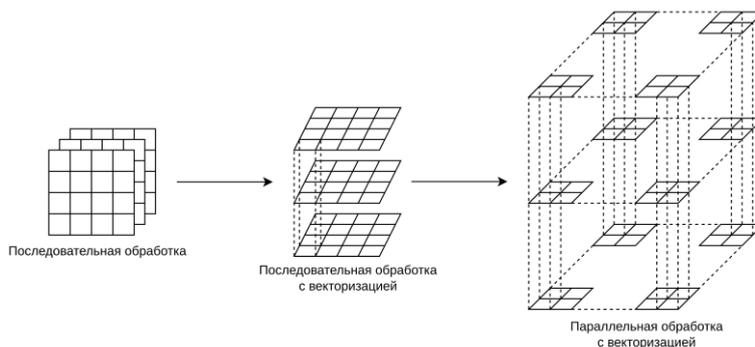


Рис. 1. Изменение схемы расчётов

Предлагаемое решение полностью сохраняет точность и полноту выходных данных. Все растровые слои формируются в географически привязанном формате с сохранением всех интерполированных значений, включая области с пропусками. Используется стандартный метод IDW с настраиваемой степенью расстояния, геодезические расчёты выполняются на эллипсоиде WGS84, а выходные файлы соответствуют спецификациям GeoTIFF.

Разработанный подход представляет собой универсальное, воспроизводимое и высокопроизводительное решение, которое позволяет перейти от многократных часов к минутам выполнения при обработке больших последовательностей временных срезов. Он не требует GPU, не зависит от коммерческого ПО и может быть развёрнут на любой современной вычислительной платформе.

**Реализация.** Реализация предлагаемого решения выполнена на языке Python с использованием стандартных библиотек, обеспечивающих высокую производительность и совместимость. Основной исполняемый модуль представляет собой командно-строчный интерфейс, который координирует весь процесс обработки – от загрузки входных данных до записи выходных GeoTIFF-файлов. Вспомогательный модуль содержит векторизованную реализацию IDW-интерполяции и отвечает за выполнение вычислений над отдельными блоками растра.

На этапе инициализации программа считывает входной CSV-файл с метеорологическими данными и JSON-файл с границами строк растра. Данные о значениях параметра группируются по ключу декады, формируя словарь, где каждому временному срезу соответствует массив значений параметров на станциях. Одновременно извлекаются уникальные координаты станций, которые используются для однократного вычисления геодезических расстояний.

Одним из главных элементов реализации является массив расстояний, формируемый с помощью библиотеки `ruproj.Geod`. Для каждой ячейки растра, ограниченной заданными границами, рассчитываются расстояния от левых нижних углов всех ячеек до каждой метеостанции. Эти вычисления выполняются векторно с использованием `numpy` и сразу применяются для расчёта интерполяции в конкретной ячейке.

Процесс интерполяции организован по принципу пакетной обработки строк раstra. Растр динамически разбивается на блоки (батчи), размер которых определяется исходя из целевого потребления оперативной памяти – по умолчанию около 200 МБ на батч. Каждый батч передаётся в отдельный рабочий процесс через `concurrent.futures.ProcessPoolExecutor`. Внутри процесса выполняется векторная интерполяция: для каждой ячейки батча и всех выбранных декад одновременно вычисляются веса IDW, а затем – недостающее значение параметра.

Запись результатов осуществляется с использованием библиотеки `rasterio`. Для каждой декады формируется отдельный GeoTIFF-файл с географической привязкой, сжатием (по умолчанию `zstd`) и блочной структурой, оптимизированной для последующего чтения в ГИС. Все выходные файлы сохраняются в указанной пользователем директории с именами, отражающими ключ декады.

Программа оснащена системой мониторинга и логирования. С помощью `tqdm` отображается текстовый прогресс-бар, показывающий количество обработанных батчей и оставшееся время. Библиотека `rsutil` используется для контроля пикового потребления памяти. По завершении выводится отчёт, содержащий общее время выполнения, среднее время на батч, коэффициент ускорения относительно последовательной обработки и максимальный объём использованной оперативной памяти.

Гибкость настройки реализована через аргументы командной строки с использованием `argparse`. Пользователь может указать начальную и конечную декаду, степень IDW, пути к входным файлам, выходную директорию, количество рабочих процессов, метод и уровень сжатия. Значения по умолчанию подобраны для баланса между производительностью и качеством.

Реализация полностью автономна, не требует установки дополнительного ПО помимо Python и указанных библиотек, и может быть запущена на любой современной системе – от ноутбука до серверной платформы. Благодаря использованию только CPU-ориентированных вычислений и стандартных форматов данных обеспечивается высокая воспроизводимость и переносимость результатов.

**Эксперименты и результаты.** Для оценки эффективности разработанного решения проведена серия экспериментов на реальных метеорологических данных за период 2015–2024 годов. Область интереса охватывала территорию 37–44° восточной долготы и 45–50° северной широты с разрешением 1 угловая секунда, что соответствует раstrу размером 25 200 × 18 000 ячеек. Использовались два вычислительных узла: ноутбук с процессором 13th Gen Intel Core i7-13650HX (14 ядер, 20 потоков) и 16 ГБ оперативной памяти, а также сервер с двумя процессорами Intel Xeon Gold 6430 (всего 64 ядра, 128 физических потоков) и 256 ГБ оперативной памяти.

Оценка вычислительной сложности проведена в идеализированных условиях, где общее время выполнения складывается из инициализации, расчёта расстояний, интерполяции и записи файлов. В последовательной реализации расстояния и веса вычисляются для каждой ячейки и каждой декады отдельно, поэтому общее время выражается как

$$T_{\text{seq}} = T_{\text{init}} + (T_1^{\text{dist}} \cdot Q + T_1^{\text{proc}} \cdot M) \cdot N + T_{\text{write}},$$

где  $T_{\text{init}}$  – время инициализации,  $T_1^{\text{dist}}$  – время расчёта одного геодезического расстояния,  $Q$  – число станций,  $N$  – число ячеек раstra,  $T_1^{\text{proc}}$  – время обработки одной ячейки для одной декады,  $M$  – число декад,  $T_{\text{write}}$  – время записи одного результата.

При векторизации расстояния вычисляются один раз, а интерполяция выполняется векторно по всем декадам, поэтому время расчёта расстояний становится  $T_1^{\text{dist-vec}} = (T_1^{\text{dist}} \cdot Q \cdot M) / S$ , где  $S$  – коэффициент ускорения векторных операций, а время обработки одной ячейки –  $T_1^{\text{proc-vec}} = T_1^{\text{proc}} \cdot N$ . Общее время:

$$T_{\text{vec}} = T_{\text{init}} + (T_1^{\text{dist-vec}} + T_1^{\text{proc}}) \cdot N + T_{\text{write}}.$$

При добавлении параллелизации вычисления и запись результатов распределяются по  $P$  процессам, поэтому время вычислений и записи включается в общий параллельный блок:

$$T_{\text{par}} = T_{\text{init}} + \frac{(T_1^{\text{dist-vec}} + T_1^{\text{proc}}) \cdot N + T_{\text{write}}}{p}$$

Эти формулы носят оценочный характер и описывают идеализированное поведение системы без учёта накладных расходов, кэш-эффектов и системных ограничений. Реальные замеры отражают фактическое поведение программы.

При увеличении числа декад (рис. 2) с 1 до 10 на ноутбуке общее время обработки остаётся практически постоянным – от 183,96 с до 211,43 секунд, что согласуется с ожиданием устранения линейной зависимости от  $M$  за счёт векторизации. Это означает, что  $T_1^{\text{proc-vec}}$  не растёт с увеличением числа декад, а доминирующим остаётся однократный расчёт расстояний. Пиковое потребление памяти растёт линейно от 1,44 ГБ до 7,07 ГБ, что соответствует ~700 МБ на декаду при целевом размере батча 200 МБ и подтверждает предсказуемость управления ресурсами. На сервере время также стабильно: от 143,39 с до 182,90 секунд, память – до 12,99 ГБ, что свидетельствует о высокой масштабируемости подхода на более мощном оборудовании. Среднее время обработки одного батча на ноутбуке составило 61 секунду, что отражает эффективность векторных операций и параллельного распределения. Также стоит отметить, что для вычислений были выбраны оптимальные количества воркеров, а именно 20 для ноутбука и 64 для сервера.

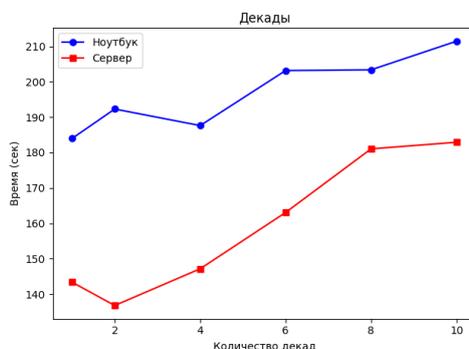


Рис. 2. Зависимость времени выполнения от количества декад

При увеличении числа параллельных процессов (рис. 3) с 1 до 32 на ноутбуке время выполнения падает с 2041,29 секунд до 204,04 секунд, что согласуется с ожидаемым линейным масштабированием до предела физических ядер. Оптимальное значение достигается при 20–32 воркерах (205,62–204,04 с), дальнейшее увеличение до 256 не даёт прироста из-за насыщения процессора и ограничений ОС по открытию файлов. На сервере при переходе от 1 к 64 воркеров время снижается с 3541,53 секунд до 130,71 секунд, что близко к теоретическому максимуму при 128 физических потоках. Стабилизация на уровне 131–158 секундах при 128–256 воркерах подтверждает достижение физического предела параллелизма и соответствует оценочной модели с учётом параллельной записи файлов. Вычисления проводились на 10 декадах, так как это близкое к максимальному значению, при котором не случается переполнение кэша процессора.

При уменьшении разрешения (рис. 4) с 1" до 3600" число ячеек  $N$  падает в миллионы раз, и время выполнения на ноутбуке снижается с 203,60 секунд до 0,16 секунд – экспоненциальное ускорение, соответствующее доминированию фактора  $N$  в формулах  $T_{\text{vec}}$  и  $T_{\text{par}}$ . Даже при практически значимом разрешении 30" (достаточном для агрометеорологических задач) время составляет всего 3,30 с. На сервере аналогичная картина: от 189,21 секунд при 1" до 9,66 секунд при 3600", с минимальными значениями 9–17 секунд при разрешении от 30" до 3600". Это показывает, что при реальных прикладных задачах с умеренным разрешением обработка становится практически мгновенной, а предлагаемое решение масштабируется идеально по пространственной размерности. Здесь использовались ранее определённые постоянные значения количества декад и параллельных процессов.

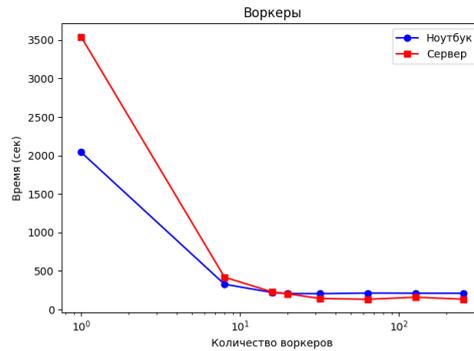


Рис. 3. Зависимость времени выполнения от количества параллельных процессов

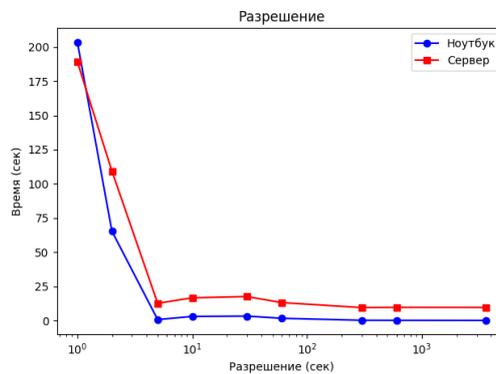


Рис. 4. Зависимость времени выполнения от пространственного разрешения

**Заключение.** Разработанный подход к оптимизации пространственной интерполяции метеорологических данных методом обратного взвешивания по расстоянию при одновременной обработке множественных декадных срезов полностью решает поставленную задачу. За счёт переосмысления схемы вычислений – однократного расчёта геодезических расстояний и векторного применения их ко всем временным слоям – устранена основная вычислительная избыточность традиционных реализаций. Параллельная обработка блоков растра на центральном процессоре с динамическим управлением памятью обеспечила масштабируемость и стабильность работы на системах различной мощности.

Реализация представляет собой готовое к использованию решение, интегрирующее все этапы – от загрузки данных до записи GeoTIFF-файлов. Программа сохраняет полный массив выходных значений, корректно обрабатывает пропуски и области с низкой плотностью станций, поддерживает сжатие и географическую привязку в соответствии со стандартами ГИС.

Экспериментальные результаты на реальных данных за 2015–2024 годы подтверждают высокую эффективность: обработка 10 декад на ноутбуке с процессором Intel Core i7-13650HX занимает менее 3,5 минут, на сервере с двумя Intel Xeon Gold 6430 – около 3 минут. Ускорение относительно последовательной с применением векторизации реализации достигает 10 и 27 раз соответственно (отличие по скорости выполнения от чистой последовательной реализации будет определяться также количеством одновременно обработанных декад). Время выполнения практически не зависит от количества декад благодаря векторизации, линейно снижается с ростом числа параллельных процессов до предела ядер и экспоненциально падает при уменьшении пространственного разрешения. Потребление памяти остаётся контролируемым – около 700 МБ на декаду при целевом размере батча 200 МБ.

Полученные результаты демонстрируют, что за счёт продуманной организации вычислительного процесса и эффективного использования стандартных возможностей центрального процессора возможно достижение производительности, ранее недоступной без специализированного оборудования. Разработанное решение делает оперативную обработку больших пространственно-временных метеорологических массивов реальностью для широкого круга исследователей и специалистов, открывая новые возможности в климатическом мониторинге, агрометеорологии и геоинформационном анализе.

*Исследование выполнено при поддержке Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета ("Приоритет 2030").*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волков А.Е., Суетина Н.В. Применение современных комплексов оптико-электронного наблюдения с высоким разрешением в системах аэрокосмического мониторинга Земли // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – № 12 (12).
2. Федотова Е.В., Маглинец Ю.А., Брежнев Р.В., Стародубцев А.И. Опыт прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур с использованием имитационных моделей // Вестник КрасГАУ. – 2020. – № 8 (161).
3. Клочков А.В., Соломко О.Б., Клочкова О.С. Влияние погодных условий на урожайность сельскохозяйственных культур // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 2.
4. Калинин В.Г., Суманеева К.И., Русаков В.С. Анализ методов интерполяции пространственного распределения метеорологических характеристик при расчетах весеннего снеготаяния // Географический вестник. – 2017. – № 2 (41).
5. Братков В.В., Бекмурзаева Р.Х., Бекмурзаева Л.Р. Возможности ГИС-технологий для оценки и мониторинга климатических условий Макажойской котловины (Чеченская Республика) // Юг России: экология, развитие. – 2024. – № 2.
6. Ботнева Ю.С., Потапов А.А. Применение геоинформационных систем в сельском хозяйстве // Вопросы науки и образования. – 2018. – № 10 (22).
7. Архипов А.В., Пряников В.С. Математическое моделирование магнитного поля Земли в системе Matlab // Вестник ЧГУ. – 2008. – № 2.
8. Тимирбаев В.Э. Геоинформационная система для мониторинга и анализа геомагнитных спутниковых наблюдений // Проблемы недропользования. – 2022. – № 1 (32).
9. Коротеев И.В., Брынь М.Я. Построение пользовательского интерфейса путем интеграции программ на языке R в систему Microsoft Visual Studio при обработке данных для задач геодезии // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2018. – № 2 (14).
10. Васильев А.А., Чащин А.Н., Лобанова Е.С. Пространственное моделирование магнитной восприимчивости почв центральной части г. Перми // Социально-экологические технологии. – 2021. – № 4.
11. Беликова М.Ю., Каранина С.Ю., Каранин А.В., Глебова А.В. Визуализация и анализ данных сети WWLLN на территории Алтае-Саянского региона средствами веб-ГИС // Кибернетика и программирование. – 2018. – № 2.
12. Кровнин А.С., Мельников С.П., Артеменков Д.В., Мурый Г.П., Никитенко А.И. Влияние крупномасштабных климатических факторов на динамику запаса тихоокеанской сайры // Тр. ВНИРО. – 2018.
13. Баранов М.Д., Кузьмин Д.А., Жукова Ж.С. Сравнение подходов к написанию нейронных сетей на Python // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2024. – № 5-1 (92).
14. Потапов В.П., Костылев М.А., Попов С.Е. Поточковая обработка радарных данных в распределенной среде Apache Spark // Вестник СПбГУ. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2017. – № 2.
15. Рязанов С.С., Кулагина В.И. Сравнительный анализ методов интерполяции топографических данных для создания цифровой модели рельефа на примере национального парка "Нижняя Кама" // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2022. – № 3.
16. Исупов К.С., Князьков В.С., Куваев А.С. Суммирование многократной точности на центральных и графических процессорах с использованием библиотеки MPRES // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 8 (202).
17. Гетманский В.В., Мовчан Е.О., Андреев А.Е. Ускорение расчета динамического напряженно-деформированного состояния с помощью наборов векторных инструкций // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 11 (184).

18. Козловский А.В., Мельник Э.В. Исследование эффективности алгоритмов обработки информации при формировании изображений группой мобильных объектов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2025. – 13 (4).
19. Козловский А.В. Распараллеливание обработки информации при формировании составных изображений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – № 1. – С. 92-103.
20. Цымблер М.Л., Полуянов А.Н., Краева Я.А. Параллельный алгоритм восстановления сенсорных данных в режиме реального времени для многоядерного процессора // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2022. – № 3.

## REFERENCES

1. Volkov A.E., Suetina N.V. Primenenie sovremennykh kompleksov optiko-elektronnoho nablyudeniya s vysokim razresheniem v sistemakh aerokosmicheskogo monitoringa Zemli [Application of modern high-resolution optoelectronic observation systems in aerospace Earth monitoring systems], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, No. 12 (12).
2. Fedotova E.V., Maglinets Yu.A., Brezhnev R.V., Starodubtsev A.I. Opyt prognozirovaniya urozhaynosti sel'skokhozyaystvennykh kultur s ispol'zovaniem imitatsionnykh modeley [The possibilities of GIS technologies for assessing and monitoring the climatic conditions of the Makazhoy Fepression (Chechen Republic, Russia)], *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University], 2020, No. 8 (161).
3. Klochkov A.V., Solomko O.B., Klochkova O.S. Vliyanie pogodnykh usloviy na urozhaynost' sel'skokhozyaystvennykh kultur [The influence of weather conditions on the yield of agricultural crops], *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy], 2019, No. 2.
4. Kalinin V.G., Sumaneeva K.I., Rusakov V.S. Analiz metodov interpol'yatsii prostranstvennogo raspredeleniya meteorologicheskikh kharakteristik pri raschetakh vesennego snegotayaniya [Analysis of interpolation methods for the spatial distribution of meteorological characteristics in the calculation of spring snowmelt], *Geograficheskiy vestnik* [Geographical Bulletin], 2017, No. 2 (41).
5. Bratkov V.V., Bekmurzaeva R.Kh., Bekmurzaeva L.R. Vozmozhnosti GIS-tekhnologiy dlya otsenki i monitoringa klimaticheskikh usloviy Makazhoyskoy kotloviny (Chechenskaya Respublika) [The possibilities of GIS technologies for assessing and monitoring the climatic conditions of the Makazhoy Fepression (Chechen Republic, Russia)], *Yug Rossii: ekologiya, razvitie* [South of Russia: ecology, development], 2024, No. 2.
6. Botneva Yu.S., Potapov A.A. Primenenie geoinformatsionnykh sistem v sel'skom khozyaystve [Application of geoinformation systems in agriculture], *Voprosy nauki i obrazovaniya* [Issues of science and education], 2018, No. 10 (22).
7. Arkhipov A.V., Pryanikov V.S. Matematicheskoe modelirovanie magnitnogo polya Zemli v sisteme Matlab [Mathematical modelling of the magnetic field of the ground in Matlab system], *Vestnik ChGU* [Bulletin of the Chuvash State University], 2008, No. 2.
8. Timirbaev V.E. Geoinformatsionnaya sistema dlya monitoringa i analiza geomagnitnykh sputnikovykh nablyudeniy [Geoinformation system for monitoring and analysis of geomagnetic satellite observations], *Problemy nedropol'zovaniya* [Subsoil Use Problems], 2022, No. 1 (32).
9. Koroteev I.V., Bryn' M.Ya. Postroenie pol'zovatel'skogo interfeysa putem integratsii programm na yazyke R v sistemu Microsoft Visual Studio pri obrabotke dannykh dlya zadach geodezii [Creation of the User Interface by Integration of Programs at Language R with the Microsoft Visual Studio System at Data Processing for Problems of Geodesy], *Intellektual'nye tekhnologii na transporte* [Intelligent Technologies on Transport], 2018, No. 2 (14).
10. Vasil'ev A.A., Chashchin A.N., Lobanova E.S. Prostranstvennoe modelirovanie magnitnoy vospriimchivosti pochv tsentral'noy chasti g. Permi [Spatial modeling of the magnetic susceptibility of soils in the central part of Perm], *Sotsial'no-ekologicheskie tekhnologii* [Socio-ecological technologies], 2021, No. 4.
11. Belikova M.Yu., Karanina S.Yu., Karanin A.V., Glebova A.V. Vizualizatsiya i analiz dannykh seti WWLLN na territorii Altae-Sayanskogo regiona sredstvami veb-GIS [Visualization and analysis of WWLLN network data in the Altai-Sayan region by means of web-GIS], *Kibernetika i programirovanie* [Cybernetics and Programming], 2018, No. 2.
12. Krovnin A.S., Mel'nikov S.P., Artemenkov D.V., Muryy G.P., Nikitenko A.I. Vliyanie krupnomasshtabnykh klimaticheskikh faktorov na dinamiku zapasa tikhoookeanskoy sayry [Impact of the large-scale climatic factors on dynamics of pacific saury stock], *Tr. VNIRO* [Proceedings of VNIRO], 2018.
13. Baranov M.D., Kuz'min D.A., Zhukova Zh.S. Sravnenie podkhodov k napisaniyu neyronnykh setey na Python [Comparison of approaches to writing neural networks in Python], *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [International Journal of Humanities and Natural Sciences], 2024, No. 5-1 (92).
14. Potapov V.P., Kostylev M.A., Popov S.E. Potokovaya obrabotka radarnykh dannykh v raspredelennoy srede Apache Spark [The streaming processing of sar data in distributed environment with Apache Spark], *Vestnik SPbGU. Seriya 10. Prikladnaya matematika. Informatika. Protssesy upravleniya* [Vestnik of Saint Petersburg University. Series 10. Applied mathematics. Computer science. Control processes], 2017, No. 2.

15. *Ryazanov S.S., Kulagina V.I.* Sravnitel'nyy analiz metodov interpolatsii topograficheskikh dannykh dlya sozdaniya tsifrovoy modeli rel'efa na primere natsional'nogo parka "Nizhnaya Kama" [Comparative analysis of methods of the digital terrain model interpolation (case study of the "Nizhnaya Kama" national park)], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya* [Moscow University Herald. Series 5. Geography], 2022, No. 3.
16. *Isupov K.S., Knyaz'kov V.S., Kuvaev A.S.* Summirovaniye mnogokratnoy tochnosti na tsentral'nykh i graficheskikh protsessorakh s ispol'zovaniem biblioteki MPRES [Summation of the multiple accuracy on central and graphic processors using the MPRES library], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 8 (202).
17. *Getmanskii V.V., Movchan E.O., Andreev A.E.* Uskorenie rascheta dinamicheskogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya s pomoshch'yu naborov vektornykh instruktsiy [Dynamical stress-strain simulation speedup using SIMD instructions], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 11 (184).
18. *Kozlovskiy A.V., Mel'nik E.V.* Issledovanie effektivnosti algoritmov obrabotki informatsii pri formirovaniy izobrazheniy gruppy mobil'nykh ob"ektov [Investigation of the effectiveness of information processing algorithms in the formation of images by a group of mobile objects], *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technology], 2025, 13 (4).
19. *Kozlovskiy A.V.* Rasparallelivaniye obrabotki informatsii pri formirovaniy sostavnykh izobrazheniy [Parallelization of information processing in the formation of composite images], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2025, No. 1, pp. 92-103.
20. *Tsymler M.L., Poluyanov A.N., Kraeva Ya.A.* Parallelnyy algoritm vosstanovleniya sensornykh dannykh v rezhime real'nogo vremeni dlya mnogoyadernogo protsessora [Parallel algorithm for real-time sensor data recovery for a many-core processor], *Vestnik YuUrGU. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Informatics], 2022, No. 3.

**Голозубов Олег Модестович** – Южный федеральный университет; e-mail: omgolozubov@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +78632184000, доб. 14101; старший научный сотрудник Исследовательской лаборатории «Интеллектуальные агроэкосистемы».

**Козловский Александр Вячеславович** – Южный федеральный университет; e-mail: kozlovskiy@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79888980779; младший научный сотрудник Исследовательской лаборатории искусственных почвенных технологий и цифровых решений.

**Мельник Эдуард Всеволодович** – Южный федеральный университет; e-mail: evmelnik@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371656; профессор кафедры вычислительной техники.

**Мельник Ярослав Эдуардович** – Южный федеральный университет; e-mail: iamelnik@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79885153420; инженер Исследовательской лаборатории искусственных почвенных технологий и цифровых решений.

**Самойлов Алексей Николаевич** – Южный федеральный университет; e-mail: asamoylov@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +78632184000, доб. 14101; старший научный сотрудник Лаборатории «Фронтальная лаборатория «Биоинженерия ризосферы»».

**Golozubov Oleg Modestovich** – Southern Federal University; e-mail: omgolozubov@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +78632184000, доб. 14101; senior researcher, Intelligent Agroecosystems Research Laboratory.

**Kozlovskiy Alexander Vyacheslavovich** – Southern Federal University; e-mail: kozlovskiy@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79888980779; junior researcher, Research Laboratory of Artificial Soil Technologies and Digital Solutions.

**Melnik Eduard Vsevolodovich** – Southern Federal University; e-mail: evmelnik@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371656; professor, Department of Computer Science.

**Melnik Yaroslav Eduardovich** – Southern Federal University; e-mail: iamelnik@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79885153420; engineer, Research Laboratory of Artificial Soil Technologies and Digital Solutions.

**Samoylov Aleksey Nikolayevich** – Southern Federal University; e-mail: asamoylov@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +78632184000, доб. 14101; senior researcher, Laboratory "Frontier Laboratory of Rhizosphere Bioengineering".