

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра дискретной математики и информационных технологий

**РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КИНЕТИЧЕСКОЙ И
ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЯ
"GEOSTATSGU"**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 421 группы
направления 09.03.01 — Информатика и вычислительная техника
факультета КНиИТ
Родионова Александра Павловича

Научный руководитель
старший преподаватель

М. В. Белоконь

Заведующий кафедрой
к. ф.-м. н., доцент

Л. Б. Тяпаев

Саратов 2026

ВВЕДЕНИЕ

География — важная наука, в которой удобство и своевременность получения информации играют очень большие роли. Именно этим обусловлена необходимость дать людям, занимающимся данной наукой возможность в удобном формате анализировать измеренные данные. Взглянув на карту, сразу становится ясно, что происходит с системой в целом. Визуализация полученных в результате расчетов гидрометеорологических величин, привязанная к на карте в широтно-долготной проекции, позволит специалисту быстро оценить состояние климатических характеристик

Исходные данные берутся из открытых источников, например, с сайта "Copernicus" (<https://cds.climate.copernicus.eu>) в формате netCDF4. Для анализа динамики климатических характеристик важно, чтобы приложение позволяло визуализировать разницу между состояниями в разные периоды.

Преподаватели и студенты географического факультета СГУ используют в учебной и научной деятельности приложение "Panoply". Но доступ к нему может быть потерян, в силу чего было принято решение о создании аналога. Разработка приложения "GeostatSGU" началась в 2023 году.

Цель бакалаврской работы — разработка программных блоков для приложения "GeostatSGU" по расчёту уравнения состояния идеального газа для сухого воздуха, потенциальной температура, доступной потенциальная энергия по Лоренцу, кинетической энергии атмосферного потока, энтальпии воздуха, потока влаги, скорости ветра как модуля вектора скорости, градиента и модуль градиента скалярного поля и графического перевода рассчитанных формул на карту Земли.

Для достижения поставленной задачи нужно решить следующие задачи:

1. Изучить теоретический материал в рамках предметной области.
2. Выбрать технологии, максимально подходящие для решения поставленных задачи.
3. Программно реализовать блоки расчета формул и визуализации расчётов.

Бакалаврская работа состоит из введения, двух разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем работы — 64 страницы, из них 42 страницы — основное содержание, включая 11 рисунков,

а также приложение на 14 страниц и список использованных источников, состоящий из 48 наименований.

В первом разделе "Выбор технологий и формул для реализации" происходит ввод основных формул, выбранных для реализации программных блоков для приложения "GeostatSGU", также в этой главе представлена краткая справка по технологиям использованных в рамках данных программных модулей для их корректной работы в рамках общего приложения. Перейдем к краткому описанию выбранных формул. В основе расчёта полей гидрометеорологических величин лежит классическое уравнение состояния идеального газа для сухого воздуха, связывающее давление, температуру и плотность и позволяющее переходить между различными термодинамическими переменными при обработке данных и в численных моделях атмосферы. Это уравнение используется при восстановлении полей плотности по известным давлениям и температурам, а также при формулировке уравнений движения и энергии в атмосфере на уровне, принятом в динамической метеорологии. Потенциальная температура определяется как температура, которую воздушный объём принял бы при адиабатическом приведении к фиксированному опорному давлению, и для идеального газа выражается степенной зависимостью от температуры и отношения давлений. Благодаря тому, что при сухоадиабатических процессах потенциальная температура остаётся практически неизменной, её поля удобно использовать для анализа стратификации и устойчивости, выделения изэнтропических поверхностей и описания вертикального обмена в атмосфере [4,9].

На основе полей температуры и плотности вводится понятие доступной потенциальной энергии по Лоренцу, характеризующей ту часть общей потенциальной энергии атмосферы, которая может быть обращена в кинетическую энергию при адиабатических перестановках воздушных масс. Доступная потенциальная энергия играет центральную роль в энергетическом цикле Лоренца, описывающем преобразования энергии между различными её формами в атмосфере, и широко применяется при анализе источников и стоков энергии крупномасштабной циркуляции, бароклинной неустойчивости и общей циркуляции атмосферы. Кинетическая энергия атмосферного потока определяется через компоненты ветра и плотность воздуха и описывает энергию, заключённую в движении воздушных масс на различных

пространственных и временных масштабах [10,11].

Энтальпия воздуха вводится как сумма внутренней энергии и произведения давления на объём и для идеального газа оказывается пропорциональной температуре. Поля энтальпии и их изменение во времени используются при анализе теплового баланса, оценке роли турбулентных и радиационных процессов и при диагностике термодинамических преобразований в различных слоях атмосферы. Существенную роль играет также поток влаги, определяемый как перенос водяного пара полем ветра и обычно записываемый в виде произведения удельного содержания влаги на вектор скорости. Вертикальное интегрирование потока влаги даёт характеристику влагопереноса в масштабах циклонов и планетарной циркуляции и связывается с формированием осадков, перераспределением скрытой теплоты и изменением энергетического баланса системы атмосфера–поверхность [4,12].

Скорость ветра при этом трактуется как модуль трёхмерного или, в приближённом виде, горизонтального вектора скорости, компоненты которого задаются в выбранной системе координат. Модуль вектора скорости находится по стандартной евклидовой норме, что обеспечивает удобную скалярную характеристику интенсивности движения, используемую при визуализации полей, оценке зон сильного ветра, расчёте потоков импульса, тепла и влаги и при постановке различных параметризаций в численных моделях. Для описания пространственной неоднородности полей скалярных величин, таких как температура, давление и удельная влажность, используется понятие градиента скалярного поля, представляющего собой вектор, направленный в сторону наибольшего возрастания величины, с модулем, равным максимальной скорости её изменения [13].

Реализация вычислений и визуализации указанных полей осуществляется с использованием языка программирования Python в сочетании с рядом специализированных библиотек. Python представляет собой высокоуровневый интерпретируемый язык с развитой стандартной библиотекой и широким набором внешних пакетов для научных вычислений, что делает его удобным инструментом для численного моделирования, обработки наблюдательных данных и прототипирования алгоритмов в метеорологии. Для организации ввода–вывода данных применяется модуль стандартной библиотеки `io`, предоставляющий абстракции текстовых, бинарных и буферизированных потоков,

а также объекты в памяти, что упрощает чтение и запись массивов гидрометеорологических полей, работу с временными буферами и подготовку графических файлов. Библиотека NumPy обеспечивает эффективное хранение и обработку многомерных массивов чисел, поддержку широкого набора математических операций и линейной алгебры и тем самым позволяет реализовать расчёты градиентов, модулей векторов, энергетических характеристик и других величин в векторизованной форме, близкой к математической записи [14-33].

Для визуализации результатов используется библиотека Matplotlib, предоставляющая средства построения двумерных графиков, карт и разрезов с гибкой настройкой оформления и возможностью экспорта рисунков в различные форматы, что важно при подготовке иллюстраций. Отображение полей на карте, учёт картографических проекций и географических особенностей области исследования выполняется с помощью библиотеки Cartopy, которая интегрируется с Matplotlib и предоставляет средства работы с проекциями, береговой линией, границами и другими географическими слоями, что позволяет строить картографически корректные изображения полей атмосферных величин. Для экспорта и элементарной постобработки полученных изображений используется библиотека Pillow (PIL), поддерживающая чтение и запись широкого набора растровых форматов, изменение размеров и формата изображений и тем самым облегчающий последующую работу с полученными картами и диаграммами [3, 34-48].

Во втором разделе "Программная реализация модулей" происходит основное описание реализованных программных блоков для приложения "GeostatSGU". Рассматриваемые программные блоки представляет собой модули для анализа атмосферных данных, включающий расчёт энергетических характеристик, градиентов полей, а также визуализацию и анимацию ветра.

Код логически делится на несколько частей: задание физических констант и географических регионов, вспомогательные функции работы с сеткой и срезами данных, реализация физических формул (энергии, плотность, потенциал, температура и т. п.), вычисление доступной потенциальной энергии (APE), комплексный расчёт энергетики атмосферы и функции визуализации. Такой подход позволяет брать многомерные массивы (по уровню давления, широте, долготе и времени) и преобразовывать их в физически интерпрети-

руемые величины.

В начале определяются регионы (REGIONS) для глобального масштаба, северного и южного полушарий, а также набор физических констант (радиус Земли, угловая скорость вращения, теплоёмкость, газовая постоянная сухого воздуха и т. д.). Вспомогательные функции `_slice` и `_slice_uv` выполняют выборку данных по широте, а также разреживают сетку по долготе и широте для удобного отображения векторных полей (стрелок ветра).

Функция `_grad2d` реализует вычисление горизонтальных градиентов с учётом сферической геометрии: широта переводится в радианы, учитывается множитель $\cos \varphi$ при расчёте расстояния по долготе, а шаги по широте и долготе переводятся из градусов в метры с использованием радиуса Земли. Это позволяет корректно рассчитывать производные по пространственным координатам на сферической сетке, а не на плоской декартовой решётке.

Блок физических формул включает вычисление плотности воздуха по уравнению состояния, кинетической энергии $KE = \frac{1}{2}\rho(u^2 + v^2)$, энтальпии $h = c_p \rho T$, модуля скорости ветра $|V| = \sqrt{u^2 + v^2}$, потенциальной температуры $\theta = T(1000/p)^{R_d/c_p}$, а также градиентов произвольных полей. Дополнительно реализованы расчёты потоков влаги $\rho q \vec{V}$ и модулей градиентов температуры и удельной влажности, что важно для диагностики фронтальных зон и бароклинических структур.

Отдельная часть посвящена вычислению доступной потенциальной энергии (APE). Температура раскладывается на зонально усреднённую компоненту и возмущение T' , вычисляется профиль статической устойчивости γ по вертикали, после чего локальная APE задаётся как $\frac{1}{2}c_p \gamma (T')^2$. Далее эта величина приводится к энергетической плотности с учётом плотности воздуха, интегрируется по вертикали (с использованием dp/g) и по поверхности Земли с весами площади ячеек сетки. В результате получается 3D-поле APE, зонально усреднённая APE, колонковая APE и полная APE всей атмосферы в рассматриваемых границах.

Функция `calculate_energies` объединяет вычисления в единую процедуру. Она загружает трёхмерные поля скорости ветра, температуры, влажности, геопотенциала и других переменных, оценивает плотность воздуха (по реальной температуре или по стандартной атмосфере, если температура отсутствует), затем вычисляет кинетическую энергию, энтальпию, модуль вет-

ра и, при наличии температуры, АРЕ. Результат возвращается в виде словаря, содержащего как основные поля (u , v , T , q , w , геопотенциал), так и диагностические величины (энергии, АРЕ, профиль статической устойчивости, температурные возмущения).

Для анализа пространственной структуры используются функции вычисления градиентов `compute_gradients`. Они получают поля на выбранном уровне давления и рассчитывают производные по геопотенциалу, скорости ветра, кинетической и потенциальной энергии, а при наличии температуры и влажности — градиенты этих величин, потенциальную температуру и потоки влаги. Эти диагностические параметры позволяют исследовать фронты, струйные течения, бароклинность и другие динамические особенности циркуляции.

Визуализация реализована через функции построения карт и анимаций. `plot_field_map` строит карту произвольного скалярного поля с использованием Cartopy: задаётся регион, отображаются суша, океан и береговая линия, а поле выводится в виде залитых изолиний. Функция `plot_field_diff_map` позволяет сравнивать два поля и их разность на одной фигуре, что удобно для анализа изменений или чувствительности. Наконец, `build_wind_gif` создаёт GIF-анимацию поля ветра во времени: фон окрашен по модулю скорости, поверх которого рисуются векторы ветра, разреженные для наглядности. Для просмотра анимации внутри среды matplotlib была сделана функция `play_gif_matplotlib`.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данной работы были решены поставленные задачи, связанные с разработкой блоков расчета формул уравнения состояния идеального газа для сухого воздуха, потенциальной температура, доступной потенциальная энергия по Лоренцу, кинетической энергия атмосферного потока, энтальпии воздуха, потока влаги, скорости ветра как модуля вектора скорости, градиента и модуль градиента скалярного поля, а также с разработкой блока графического переноса рассчитанных формул на карту Земля для приложения "GeostatSGU", были выбраны максимально подходящие технологии для поставленной цели, также были изучены формулы, которые в последствии стали базисом для разработанных блоков по расче-

там соответствующих формул, а также в ходе разработки был реализован блок позволяющий переводить рассчитанные формулы на плоскость Земли.

В теоретической части были рассмотрены необходимые технологии нужные для разработки соответствующих блоков, а именно язык программирования Python, а также следующие библиотеки для этого языка программирования: NumPy, Matplotlib, Cartopy, Pillow (PIL), а также модуль io стандартной библиотеки Python. Были изучены принципы работы технологий, а также были изучены принципы их взаимодействия друг с другом.

В практической части работы были реализованы блоки расчета следующих формул: уравнения состояния идеального газа для сухого воздуха, потенциальной температура, доступной потенциальная энергия по Лоренцу, кинетической энергия атмосферного потока, энтальпии воздуха, потока влаги, скорости ветра как модуля вектора скорости, градиента и модуль градиента скалярного поля. А также в практической части был реализован блок перенос рассчитанных формул на плоскость Земли, а также блок наглядно показывающий изменение в системе в целом по целевому показателю за разные сроки.

Таким образом, все задачи бакалаврской работы решены, цель достигнута.

Основные источники информации:

- 1 Python 3.14.4 documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.python.org/3/> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 2 Matplotlib Documentation. [Электронный ресурс]. URL: <https://matplotlib.org/stable/contents.html> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 3 Cartopy Documentation. Introduction. [Электронный ресурс]. URL: <https://cartopy.readthedocs.io> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 4 Holton, J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology. 4th ed. [Электронный ресурс]. URL: https://webspacescience.uu.nl/~delde102/Holton_2004.pdf (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 5 Wallace, J. M., Hobbs, P. V. Atmospheric Thermodynamics. [Электронный ресурс]. URL:

- https://gibbs.science/teaching/efd/handouts/wallace_hobbs_ch3.pdf
(дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 6 Fred Kucharski, Atmospheric (Climate) Dynamics. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ictp.it/sites/default/files/%5Bteaching-materials%5D/lecture_notes_AD_section1_1.pdf
(дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 7 Peter Stone, Lorenz Energy Cycle in Atmosphere. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scribd.com/document/313146300/c-Irc-Atm-Ciclu-Energetic>
(дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 8 J. Mulmenstadt, Climate Dynamics. [Электронный ресурс]. URL: <https://home.uni-leipzig.de/jmuelmen/lehre/cd/cd-2019/lec06.pdf>
(дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 9 Lautenschlager, M. et al., *Lectures on Dynamical Meteorology* [Электронный ресурс]. URL: https://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/~roger/Lectures/Dm_Lectures/DM_2014.pdf
(дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 10 Oort, A. H., *On Estimates of the Atmospheric Energy Cycle*, Monthly Weather Review, Volume 92, Number 11, 1964. [англ.]
- 11 Lorenz Energy Cycle in Atmosphere [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.scribd.com/document/313146300/c-Irc-Atm-Ciclu-Energetic>
(дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 12 Atmospheric Thermodynamics [Электронный ресурс]. URL: https://atoc.colorado.edu/cassano/atoc5050/Lecture_Notes/wh_ch3_part2.pdf
(дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 13 Michael Corral, *Vector Calculus* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mecmath.net/VectorCalculus.pdf>
(дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 14 Python Software Foundation, *What is Python? Executive Summary* [Элек-

- тронный ресурс]. URL: <https://www.python.org/doc/essays/blurb/> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 15 Python Software Foundation, *Welcome to Python.org* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.python.org> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 16 Wikipedia, *Python (programming language)* [Электронный ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Python_\(programming_language\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Python_(programming_language)) (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 17 Wikipedia, *Python* [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Python> (дата обращения: 03.05.2026).
- 18 Python Package Index, *PyPI – The Python Package Index* [Электронный ресурс]. URL: <https://pypi.org> (дата обращения: 03.05.2026).
- 19 Amazon Web Services, *What is Python? - Python Language Explained* [Электронный ресурс]. URL: <https://aws.amazon.com/what-is/python/> (дата обращения: 03.05.2026).
- 20 Python Software Foundation, *io – Core tools for working with streams, Python 3 Standard Library Documentation* [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.python.org/3/library/io.html> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 21 W3Schools, *Python io Module* [Электронный ресурс]. URL: https://www.w3schools.com/python/ref_module_io.asp (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 22 Python Standard Library Source, *Source code for io* [Электронный ресурс]. URL: https://tedboy.github.io/python_stdlib/_modules/io.html (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 23 DEV Community, *File-Like Objects in Python* [Электронный ресурс]. URL: <https://dev.to/bluepaperbirds/file-like-objects-in-python-1njf> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 24 AskPython, *Python IO Module: The Complete Practical Reference* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.askpython.com/python-modules/python-io-module> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 25 DigitalOcean, *Python io.BytesIO and io.StringIO: Memory File Guide* [Электронный ресурс]. URL:

- <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/python-io-bytesio-stringio> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 26 NumPy Developers, *NumPy – The fundamental package for scientific computing with Python* [Электронный ресурс]. URL: <https://numpy.org> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 27 NumPy Developers, *What is NumPy?* [Электронный ресурс]. URL: <https://numpy.org/doc/stable/user/whatisnumpy.html> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 28 NumPy Developers, *NumPy documentation – User Guide and Reference* [Электронный ресурс]. URL: <https://numpy.org/doc/stable/> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 29 NumPy Project, *numpy – PyPI* [Электронный ресурс]. URL: <https://pypi.org/project/numpy/> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 30 GeeksforGeeks, *NumPy – ndarray* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/numpy/numpy-ndarray/> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 31 ArX Machine Learning, *Understanding NumPy N-dimensional Arrays* [Электронный ресурс]. URL: <https://arxml.com/courses/essential-numpy-pandas/chapter-2-getting-started-numpy-arrays/understanding-ndarrays> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 32 NumPy Developers, *numpy.ndarray – NumPy Manual* [Электронный ресурс]. URL: <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.ndarray.html> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 33 freeCodeCamp, *The Ultimate Guide to the NumPy Package for Scientific Computing* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.freecodecamp.org/news/the-ultimate-guide-to-the-numpy-scientific-computing-library-for-python/> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 34 Matplotlib Developers, *Matplotlib: Visualization with Python* [Электронный ресурс]. URL: <https://matplotlib.org> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 35 Matplotlib Developers, *Matplotlib 3.10.9 documentation* [Электронный ре-

- сурс]. URL: <https://matplotlib.org/stable/index.html> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 36 Matplotlib Project, *matplotlib 3.10.9* [Электронный ресурс]. URL: <https://pypi.org/project/matplotlib/> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 37 Matplotlib Developers, *matplotlib.pyplot* [Электронный ресурс]. URL: https://matplotlib.org/api/_as_gen/matplotlib.pyplot.html (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 38 Matplotlib Developers, *Pyplot tutorial* [Электронный ресурс]. URL: <https://matplotlib.org/stable/tutorials/pyplot.html> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 39 W3Schools, *Matplotlib Plotting* [Электронный ресурс]. URL: https://www.w3schools.com/python/matplotlib_plotting.asp (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 40 Cartopy Project, *Cartopy — PyPI* [Электронный ресурс]. URL: <https://pypi.org/project/Cartopy/> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 41 Pythia Foundations, *Introduction to Cartopy* [Электронный ресурс]. URL: <https://foundations.projectpythia.org/core/cartopy/cartopy/> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 42 SciTools, *Releases · SciTools/cartopy* [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/SciTools/cartopy/releases> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 43 GeoPandas, *Plotting with CartoPy and GeoPandas* [Электронный ресурс]. URL: https://geopandas.org/en/stable/gallery/cartopy_convert.html (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 44 Python Package Index, *Pillow — PyPI* [Электронный ресурс]. URL: <https://pypi.org/project/pillow/> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 45 Pillow Developers, *Pillow (PIL Fork) documentation* [Электронный ресурс]. URL: <https://pillow.readthedocs.io> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]
- 46 Real Python, *Image Processing With the Python Pillow Library* [Электронный ресурс]. URL: <https://realpython.com>

/image-processing-with-the-python-pillow-library/ (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]

47 InfoWorld, *The basics of Pillow, Python's image manipulation library* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.infoworld.com/video/3480797/the-basics-of-pillow-pythons-image-manipulation-library.html> (дата обращения: 03.05.2026). [англ.]

48 PythonRu, *Как работать с библиотекой Python Pillow (форк PIL)* [Электронный ресурс]. URL: <https://pythonru.com/biblioteki/osnovnye-vozmozhnosti-biblioteki-python-imaging-library-pillow-pil> (дата обращения: 03.05.2026).