(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

УДК: 528.94:004.42:519.246.8 10.70769/3030-3214.SRT.4.4.2026.7

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕРЕПРОЕЦИРОВАНИЯ КООРДИНАТ СКВАЖИН И ПРОВЕРКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА БЕЛАРУСИ. ЧАСТЬ 1: ПОДГОТОВКА ДАННЫХ, МОДУЛЬ GEOPROJECTOR-BY И КАРТОМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА



Бильдюк Егор Викторович

Старший преподаватель кафедры «Горные работы», аспирант, магистр технических наук, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь
E-mail: bilduk@bntu.by
ORCID ID: 0000-0001-8494-9093



Носуля Игорь Евгеньевич

Аспирант кафедры «Горные работы» Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь
E-mail: gr@bntu.by



Разводовский Александр Александрович

Аспирант кафедры «Горные работы» Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь
E-mail: fgde@bntu.by

Аннотация. *В статье исследованы методы автоматизированного перепроецирования координат буровых скважин, подготовки пространственных данных и картометрической проверки для построения цифровой модели рельефа Республики Беларусь. Основная цель исследования заключается в автоматизации преобразования координат скважин из географической системы WGS84 в проекцию UTM 35N, обосновании выбора картографической проекции и оценке влияния системы координат на геометрическую точность определения площади территории. В качестве исходной информации использованы координаты устьев и абсолютные высотные отметки более 30 тысяч скважин из базы данных о буровой изученности Республики Беларусь. Рассмотрен разработанный программный модуль GeoProjector-BY на языке Python с использованием библиотек pandas и pyproj, обеспечивающий чтение данных различных форматов, выявление и исправление инверсии географических координат, фильтрацию ошибочных записей с применением статистического критерия 3×IQR и автоматизированное преобразование координат из EPSG:4326 в EPSG:32635. По результатам картометрического анализа установлено, что максимальные искажения длин в проекции UTM 35N не превышают 0,16%, а искажения площадей находятся в пределах от −0,08% до +0,32%. Геодезическая площадь территории Беларуси на эллипсоиде WGS84 составила 207 499 км², тогда как площадь, рассчитанная в проекции UTM 35N, равна 207 459 км², что соответствует отклонению −0,02%. При использовании географических координат с одинаковым масштабом градусных осей площадь территории оказывается завышенной на 67,6%. Полученные результаты подтверждают необходимость обоснованного выбора системы координат, контроля качества пространственных данных и минимизации картометрических погрешностей при построении цифровых моделей рельефа. Предложенный подход имеет практическое*

значение для подготовки пространственной информации в геологоразведочных, горнотехнических и геоинформационных исследованиях.

Ключевые слова: *координаты скважин, перепроецирование, цифровая модель рельефа, GeoProjector-BY, WGS84, UTM 35N, Python, pyproj, геоинформационные системы, пространственные данные, картометрическая проверка, преобразование координат, Беларусь.*

Received: 02.07.2026 | Accepted: 24.07.2026 | Issue publication: 28.09.2026

QUDUQ KOORDINATALARINI QAYTA PROYEKSIYALASHNI AVTOMATLASHTIRISH VA BELARUS RAQAMLI RELYEF MODELINI TEKSHIRISH. 1-QISM: MA'LUMOTLARNI TAYYORLASH, GEOPROJECTOR-BY MODULI VA KARTOMETRIK BAHOLASH

Bildyuk Yegor Viktorovich
Belarus milliy texnika universiteti "Kon ishlari" kafedrasi katta o'qituvchisi, tayanch doktorant, texnika fanlari magistri, Minsk, Belarus

Nosulya Igor Yevgenyevich
Belarus milliy texnika universiteti "Kon ishlari" kafedrasi tayanch doktoranti, Minsk, Belarus

Razvodovskiy Aleksandr Aleksandrovich
Belarus milliy texnika universiteti "Kon ishlari" kafedrasi tayanch doktoranti, Minsk, Belarus

Annotatsiya. *Mazkur maqolada Belarus Respublikasi hududining raqamli relyef modelini yaratish uchun burg'ilash quduqlari koordinatalarini avtomatlashtirilgan qayta proyeksiyalash, fazoviy ma'lumotlarni tayyorlash va kartometrik tekshirish usullari tadqiq etilgan. Tadqiqotning asosiy maqsadi quduq koordinatalarini WGS84 geografik koordinatalar tizimidan UTM 35N proyeksiyasiga o'tkazish jarayonini avtomatlashtirish, kartografik proyeksiya tanlovini asoslash hamda koordinatalar tizimining hudud maydonini aniqlashdagi geometrik aniqlikka ta'sirini baholashdan iborat. Tadqiqotda Belarus Respublikasining burg'ilash orqali o'rganilganligi ma'lumotlar bazasidagi 30 mingdan ortiq quduq og'zi koordinatalari va mutlaq balandlik ko'rsatkichlaridan foydalanilgan. Python dasturlash tili hamda pandas va pyproj kutubxonalari asosida ishlab chiqilgan GeoProjector-BY moduli yordamida turli formatdagi ma'lumotlarni o'qish, geografik koordinata o'qlarining almashib ketishini aniqlash va tuzatish, noto'g'ri yozuvlarni 3×IQR statistik mezoni asosida filtrlash hamda EPSG:4326 tizimidan EPSG:32635 tizimiga koordinatalarni avtomatik o'zgartirish imkoniyatlari ko'rib chiqilgan. Kartometrik tahlil natijasida UTM 35N proyeksiyasida uzunliklarning maksimal buzilishi 0,16 % dan oshmasligi, maydon buzilishlari esa −0,08% dan +0,32% gacha o'zgarishi aniqlangan. Belarus hududining WGS84 ellipsoidi bo'yicha geodezik maydoni 207 499 km², UTM 35N proyeksiyasida hisoblangan maydoni esa 207 459 km² ni tashkil etib, ular orasidagi tafovut −0,02% ga teng bo'lgan. Geografik koordinatalarni bir xil masshtabli gradus o'qlarida tasvirlashda esa maydon 67,6% ga ortiqcha baholanishi ko'rsatilgan. Tadqiqot natijalari raqamli relyef modellarini yaratishda koordinatalar tizimini to'g'ri tanlash, fazoviy ma'lumotlarning sifatini nazorat qilish va kartometrik xatoliklarni kamaytirish muhimligini asoslaydi. Taklif etilgan yondashuv geologik-qidiruv, konchilik va geoinformatsion modellashtirish jarayonlarida fazoviy ma'lumotlarni tayyorlash uchun amaliy ahamiyatga ega.*

Kalit so'zlar: *quduq koordinatalari, qayta proyeksiyalash, raqamli relyef modeli, GeoProjector-BY, WGS84, UTM 35N, Python, pyproj, geografik axborot tizimlari, fazoviy ma'lumotlar, kartometrik tekshiruv, koordinatalar transformatsiyasi, Belarus.*

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

AUTOMATED REPROJECTION OF BOREHOLE COORDINATES AND VERIFICATION OF THE DIGITAL ELEVATION MODEL OF BELARUS. PART 1: DATA PREPARATION, THE GEOPROJECTOR-BY MODULE, AND CARTOMETRIC ASSESSMENT

Bildyuk Egor Viktorovich

Senior Lecturer, Department of Mining, Postgraduate Researcher, Master of Technical Sciences, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Nosulya Igor Evgenyevich

Postgraduate Researcher, Department of Mining, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Razvodovsky Alexander Alexandrovich

Postgraduate Researcher, Department of Mining, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. *This article investigates methods for automated reprojection of borehole coordinates, spatial data preparation, and cartometric verification for developing a digital elevation model of the Republic of Belarus. The primary objective of the study is to automate the transformation of borehole coordinates from the WGS84 geographic coordinate system to the UTM 35N projection, justify the selection of an appropriate map projection, and evaluate the influence of coordinate systems on the geometric accuracy of territorial area calculations. The study uses geographic coordinates and absolute elevation data from more than 30,000 borehole collars contained in the national borehole exploration database of Belarus. The developed GeoProjector-BY software module, implemented in Python using the pandas and pyproj libraries, is examined in terms of its capabilities for processing various data formats, detecting and correcting reversed latitude–longitude coordinates, filtering erroneous records using the 3×IQR statistical criterion, and automatically transforming coordinates from EPSG:4326 to EPSG:32635. The cartometric analysis demonstrates that maximum linear distortion within the UTM 35N projection does not exceed 0.16%, while area distortion varies from −0.08% to +0.32%. The geodesic area of Belarus calculated on the WGS84 ellipsoid is 207,499 km², whereas the corresponding area obtained in the UTM 35N projection is 207,459 km², representing a deviation of −0.02%. In contrast, representing geographic coordinates using equally scaled degree axes results in an overestimation of territorial area by 67.6%. These findings highlight the importance of selecting appropriate coordinate reference systems, ensuring spatial data quality, and minimizing cartometric errors when developing digital elevation models. The proposed approach provides practical benefits for spatial data preparation in geological exploration, mining engineering, and geoinformation modeling applications.*

Keywords: *borehole coordinates, coordinate reprojection, digital elevation model, GeoProjector-BY, WGS84, UTM 35N, Python, pyproj, geographic information systems, spatial data, cartometric verification, coordinate transformation, Belarus.*

Введение. Цифровые модели рельефа (ЦМР) [1] и карты поверхности, построенные по отметкам устьев скважин, применяются при геолого-разведочных и горно-технических работах: от подсчёта запасов и проектирования карьеров до инженерно-геологического районирования. Исходные данные для таких построений, как правило, поступают из государственных архивов в виде таблиц координат и абсолютных отметок. Координаты чаще всего хранятся в географической системе WGS84 (градусы), в файлах разных форматов и с неоднородным порядком столбцов. Прямое построение карты по таким данным сопряжено с тремя рисками: ошибками порядка осей, неконтролируемыми выбросами и геометрическими искажениями, которые вносит неравнозначность градусной меры по широте и долготе.

Расстояния между точками используются при вариографии, поиске соседей и вычислении весов интерполяции, поэтому от системы координат зависят не только форма и площадь отображаемой территории, но и сама интер-

полированная поверхность. На широте Беларуси (около 54° с. ш.) длина дуги 1° долготы составляет около 65 км, 1° широты — около 111 км:

$$\ell_\lambda(\varphi) \approx \frac{\pi}{180^\circ}\frac{a\cos\varphi}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}}, \qquad \frac{\ell_\varphi}{\ell_\lambda}\Big|_{\varphi=54^\circ} \approx 1{,}7, \qquad (1)$$

где a — большая полуось эллипсоида, e — его эксцентриситет, φ — широта. Если оси карты в градусах выведены в одном масштабе, территория растягивается вдоль параллелей примерно в 1,7 раза, а её площадь завышается в той же пропорции. Рельеф Беларуси подробно описан в геоморфологической литературе [2], однако для количественных приложений нужна численная поверхность, отображающая территорию без искажений, и количественная оценка её точности.

Цель работы — разработать и описать программные средства автоматизированного перепроецирования координат скважин и подготовки контура территории, обосновать выбор проекции и картометрически оценить влияние системы координат на площадь территории по данным о более чем 30 000 скважин Республики Беларусь.

Задачи исследования:

1. описать модуль GeoProjector-BY, автоматизирующий перепроецирование WGS84 → UTM 35N с контролем качества данных;
2. обосновать выбор проекции и оценить её искажения на территории Беларуси;
3. описать подготовку границы территории для бланкирования сеток в Surfer;
4. картометрически проверить площадь территории в градусной и метрической системах тремя способами.

Научная новизна работы состоит в количественной оценке последствий выбора системы координат для картографического представления территории национального масштаба по массиву более 30 000 скважин и в описании воспроизводимой процедуры подготовки данных с автоматическим контролем (порядок осей, рамки территории, диапазон отметок, выбросы, обратное преобразование). Новизна самих методов интерполяции и проекционных преобразований не заявляется.

Практическая значимость определяется тем, что описанная процедура и контрольные проверки применимы к любым массивам точечных данных в географических координатах.

Статья является первой частью цикла из трёх связанных работ. В ней рассмотрены подготовка данных, выбор проекции и картометрическая проверка; построение моделей рельефа и их верификация по независимому эталону FABDEM рассматриваются во второй части, а горно-технические последствия выбора системы координат (ошибки объёмов вскрыши и уклонов) — в третьей.

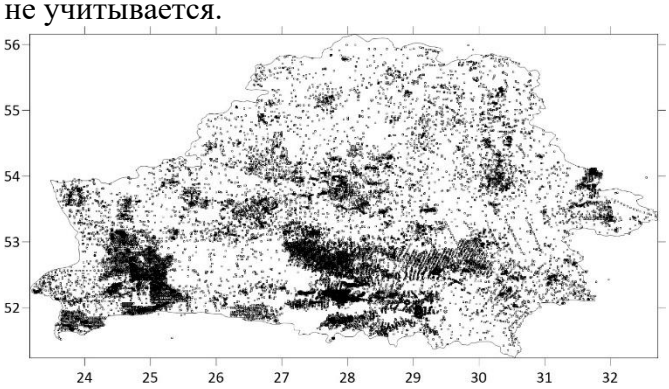
Анализ литературы и методы

Анализ литературы. Вопросы выбора картографической проекции и искажений длин, углов и площадей подробно изложены в [3, 4]; практика работы с системами координат и геометриями при пространственном анализе данных — в [5, 6, 7]. Методы пространственной интерполяции сопоставлены в обзорах [8]: результат зависит от метода, плотности данных и параметров окрестности; наряду с кригингом развиваются методы машинного обучения [9, 10]. Для независимой проверки моделей используются глобальные ЦМР [11, 12]. Практика построения сеточных моделей по скважинным данным в ГИС-пакетах изложена в учебно-методическом комплексе кафедры «Горные работы» БНТУ [13]. Систематического сопоставления построения ЦМР в градусной и метрической системах координат по скважинному массиву национального масштаба в рассмотренных источниках не обнаружено; этим определяется постановка настоящей работы. Новизна самого метода интерполяции не заявляется: основное внимание уделено подготовке координат, выбору проекции и картометрической проверке.

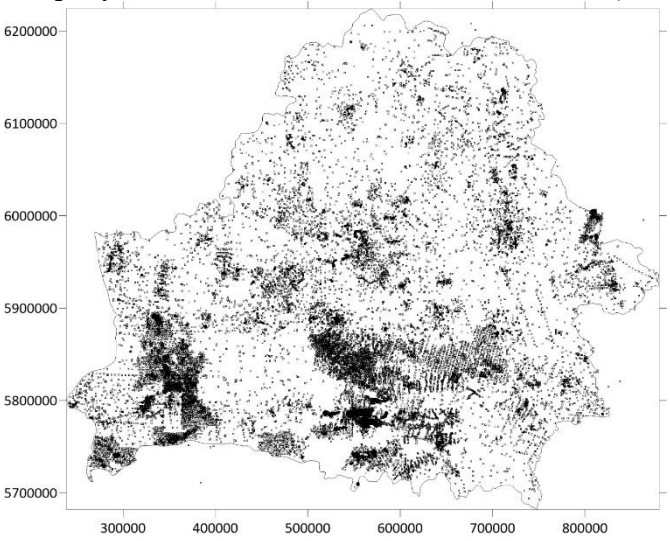
Исходные данные. В качестве исходной информации использовалась база данных «Буровая изученность Республики Беларусь», созданная ГП «НПЦ по геологии». Общий объём выборки — более 30 000 точек наблюдений, содержащих координаты расположения устьев скважин и соответствующие абсолютные отметки поверхности рельефа. Координаты скважин заданы в географической системе WGS84 (градусы); это допущение принято по описанию базы данных и не проверялось независимо: при иной исходной системе

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

(например, привязанной к эллипсоиду Красовского) положение точек могло бы смещаться до сотен метров. При площади территории около 207,5 тыс. км² средняя плотность составляет не менее одной скважины на 7 км²; размещение крайне неравномерно: плотные скопления и линейные цепочки приурочены преимущественно к южной и юго-западной частям территории, на севере сеть существенно разрежена (рисунок 1). Погрешность архивных отметок может быть неоднородной и в оценках не учитывается.



а) географические координаты (WGS84, градусы; оси выведены в одном масштабе)



б) проекция UTM, зона 35N (координаты в километрах)

Рис.1. Размещение скважин базы данных «Буровая изученность Республики Беларусь» и контур государственной границы (одни и те же точки в двух системах координат).

Программный модуль GeoProjector-BY. Предобработка и перепроецирование координат выполнены авторским модулем GeoProjector-BY на языке Python 3 с библиотеками pandas [14] (чтение, фильтрация и запись таблиц) и pyproj [15] (интерфейс к библиотеке PROJ). Модуль приводит координаты устьев скважин из геодезической системы WGS84 (эллипсоидальные координаты, градусы) к плоской прямоугольной системе UTM, зона 35N (EPSG:32635). Обработка включает пять этапов; ядро алгоритма приведено в листинге 1.

Чтение данных. По первым строкам файла определяются разделитель полей (точка с запятой, табуляция, запятая, пробел), наличие заголовка и десятичный знак, что позволяет обрабатывать файлы .dat, .csv и .txt без ручной правки. Первые три столбца — долгота, широта и отметка устья.

Нормализация осей. Диапазоны широты (51,2–56,2° с. ш.) и долготы (23,1–32,8° в. д.) для Беларуси не пересекаются, поэтому порядок столбцов в каждой записи определяется однозначно; при порядке «широта — долгота» столбцы меняются местами.

Контроль качества. Из исходного массива отбраковывались записи с пропущенными или нечисловыми значениями, с координатами за пределами рамок территории Беларуси, а также с абсолютными отметками вне допустимого диапазона от −100 до 1000 м. Для первичной автоматизированной фильтрации явных ошибок ввода (перестановка цифр, пропуск десятичной точки) применялся статистический критерий $3 \times IQR$ ($z_i \notin [Q_1 - 3 \cdot IQR; Q_3 + 3 \cdot IQR]$, где $IQR = Q_3 - Q_1$). Отсечённые записи с указанием причины фиксировались в журнале отбраковки. Поскольку границы данного критерия рассчитываются по самой выборке и формально не гарантируют сохранения естественных экстремумов рельефа, журнальные записи дополнительно сопоставлялись с физическим диапазоном высот поверхности Беларуси (от 80 м в долине р. Неман до 345 м на г. Дзержинская). По результатам проверки выходящих за физически допустимые пределы отметок устьев скважин не выявлено — все атрибутивные данные после предварительной очистки строго находятся в интервале от 80 до 345 м.

Трансформация. Объект Transformer создаётся методом from_crs для пары EPSG:4326

Листинг 1. Ядро модуля GeoProjector-BY: нормализация, фильтрация, трансформация координат и проверка обратного преобразования

```
import pandas as pd
import numpy as np
from pyproj import CRS, Transformer

SRC, DST = CRS.from_epsg(4326), CRS.from_epsg(32635)
LAT, LON, Z = (51.2, 56.2), (23.1, 32.8), (-100.0, 1000.0)

def normalize(df):                        # столбцы: a, b, Z (числа)
    direct  = df.a.between(*LON) & df.b.between(*LAT)
    swapped = df.a.between(*LAT) & df.b.between(*LON)
    lon = df.a.where(~swapped, df.b)
    lat = df.b.where(~swapped, df.a)
    valid = (direct | swapped) & df.Z.between(*Z)
    return pd.DataFrame({"lon": lon, "lat": lat, "Z": df.Z})[valid]

def iqr_mask(s, k=3.0):                   # критерий k×IQR
    q1, q3 = s.quantile([0.25, 0.75])
    iqr = q3 - q1
    return s.between(q1 - k * iqr, q3 + k * iqr)

clean = normalize(raw)
clean = clean[iqr_mask(clean.Z)]

fwd = Transformer.from_crs(SRC, DST, always_xy=True)
inv = Transformer.from_crs(DST, SRC, always_xy=True)
E, N = fwd.transform(clean.lon.to_numpy(), clean.lat.to_numpy())
lon2, lat2 = inv.transform(E, N)
# Максимальная ошибка round-trip в угловых координатах
err_lon = np.max(np.abs(clean.lon.to_numpy() - lon2))
err_lat = np.max(np.abs(clean.lat.to_numpy() - lat2))
print(f"Максимальная ошибка обратного преобразования: lon={err_lon:.3e}°, lat={err_lat:.3e}
°")

pd.DataFrame({"Easting_M": E, "Northing_M": N,
              "Elevation_Z": clean.Z.to_numpy()}
             ).to_csv(out, index=False, sep=";", decimal=".")
```

→ EPSG:32635 с параметром always_xy=True. Параметр необходим, поскольку определение EPSG:4326 задаёт порядок осей «широта, долгота», а в файлах данных принят порядок «долгота (x), широта (y)»: без него для точки 27,0° в. д., 53,9° с. ш. вместо E ≈ 500 000 м, N ≈ 5 972 396 м возвращаются значения порядка 3 227 000 и 3 292 000 м без сообщения об ошибке. Массив преобразуется одним векторным вызовом (для 30 тыс. точек — менее 0,1 с). Отметки Z при перепроецировании не изменяются.

Экспорт и контроль. Результат записывается в CSV (Easting_M, Northing_M, Elevation_Z) с разделителем «;» и десятичной точкой; для контроля выполняется обратное преобразование UTM → WGS84, максимальное расхождение выводится в отчёте.

В листинге опущены чтение исходного файла, формирование журнала отбракованных записей и полная обработка исключений. Перед расчётом предполагается, что таблица raw уже загружена и содержит числовые столбцы a, b и Z, а переменная out задаёт путь выходного CSV. Обратная проверка в листинге оценивает максимальное расхождение исходных и восстановленных долготы и широты; конкретное численное значение должно быть получено запуском полного модуля на исходном массиве.

Выбор проекции. Вариография и кригинг оперируют евклидовыми расстояниями, поэтому для расчётов необходима плоская прямоугольная система в метрах. Проекция UTM (поперечно-цилиндрическая конформная проекция на эллипсоиде WGS84) сохраняет углы и форму бесконечно малых фигур, согласуется с GNSS-координатами и глобальными моделями рельефа и поддерживается всеми ГИС-пакетами [3, 4].

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

Переход от геодезических координат WGS84 к проекции UTM (зона 35N, EPSG:32635) на том же эллипсоиде является картографическим проецированием, а не преобразованием датума. Единая зона 35N выбрана также из-за прямой совместимости с глобальными моделями рельефа (Copernicus DEM, FABDEM) [11, 12]. Официальной системой отсчёта геодезических координат в Республике Беларусь является СК-95; прямое преобразование к ней в настоящей работе не выполнялось, так как задача носит региональный картографический характер и карта не привязывается к государственной геодезической основе; масштабные искажения UTM 35N оценены ниже.

Территория Беларуси по долготе (23,1–32,8° в. д.) охватывает зоны UTM 34–36, поэтому применение единой зоны 35N (осевой меридиан $\lambda_0 = 27°$ в. д.) вносит искажения длин. Масштабный множитель в первом приближении описывается выражением

$$k(\varphi,\lambda) \approx k_0\left[1 + \frac{(\Delta\lambda\cos\varphi)^2}{2}(1+\eta^2)\right],$$
$$k_0 = 0{,}9996, \quad \Delta\lambda = \lambda - \lambda_0, \qquad (2)$$

где $\eta^2 = e'^2\cos^2\varphi$ — малая поправка. По расчёту средствами pyproj [15] множитель изменяется от 0,9996 на осевом меридиане до 1,0005 на западной границе и до 1,0016 на юго-востоке (51,5° с. ш.; 32,8° в. д.), то есть максимальное искажение длин составляет около 0,16 % (около 1,6 м на 1 км); искажение площади ($\approx k^2$) — от −0,08 до +0,32 %. Для радиуса корреляции остатков (≈144 км) это даёт изменение порядка 0,2 км, что пренебрежимо мало для региональной карты, но не для маркшейдерских расчётов на отдельных объектах (часть 3).

Единая зона 35N выбрана как простейший вариант для региональной карты; альтернативами служат построение по зонам (например, в системе координат Гаусса — Крюгера) или проекции, подобранные под территорию (равновеликая коническая, Equal Earth [16] или равноугольная коническая), однако они усложняют создание единой сетки и в настоящей работе не рассматривались.

Подготовка границы территории. Для бланкирования сеток и сопоставления рисунков использован эталонный контур государственной границы Natural Earth (масштаб 1:10 000 000, 1 173 вершины) [17]. Скрипт на Python (GeoPandas, Shapely) загружает контур, преобразует его из WGS84 в UTM 35N и записывает в формате Golden Software Blanking File (.bln): первая строка каждого полигона содержит число вершин и флаг бланкирования (0 — бланкируется область вне контура), далее следуют координаты вершин (листинг 2). Контуры в градусах и в метрах получены из одного источника, поэтому различие между сетками обусловлено только системой координат. Сетки обрезаны по этим контурам командой Grid → Blank.

Листинг 2. Подготовка границы территории в форматах.bln (градусы и UTM 35N)

```
import geopandas as gpd
from shapely.geometry import MultiPolygon

def save_to_bln(geom, filename):
    polys = geom.geoms if isinstance(geom, MultiPolygon) else [geom]
    lines = []
    for poly in polys:
        for ring in [poly.exterior, *poly.interiors]:
            pts = list(ring.coords)
            lines.append(f"{len(pts)}, 0")              # число вершин, флаг
            lines += [f"{x:.6f}, {y:.6f}" for x, y in pts]
    open(filename, "w", encoding="utf-8").write("\n".join(lines))

world = gpd.read_file("ne_10m_admin_0_countries.geojson")    # Natural Earth
by = world[world["ADMIN"] == "Belarus"].geometry.iloc[0]
gdf = gpd.GeoDataFrame(geometry=[by], crs="EPSG:4326")

save_to_bln(gdf.geometry.iloc[0], "belarus_deg.bln")                  # градусы
save_to_bln(gdf.to_crs(epsg=32635).geometry.iloc[0],
            "belarus_utm35n.bln")                                     # метры
```

Картометрическая проверка площади

Чтобы убедиться, что карта в UTM 35N передаёт реальную территорию Беларуси,

Листинг 3. Расчёт площади полигона границы тремя способами

```
import numpy as np
from pyproj import Geod, Transformer

def shoelace(x, y):                          # формула Гаусса для площади многоугольника
    return abs(0.5 * np.sum(x * np.roll(y, -1) - np.roll(x, -1) * y))

lon, lat = border[:, 0], border[:, 1]      # граница, WGS84, градусы

# 1) геодезическая площадь на эллипсоиде WGS84 (эталон)
a_geo = abs(Geod(ellps="WGS84").polygon_area_perimeter(lon, lat)[0]) / 1e6

# 2) плоская площадь в UTM 35N
x, y = Transformer.from_crs(4326, 32635, always_xy=True).transform(lon, lat)
a_utm = shoelace(np.asarray(x), np.asarray(y)) / 1e6

# 3) градусы как равные единицы длины (1 град = 111.195 км)
a_deg = shoelace(lon, lat) * 111.195 ** 2

for name, a in (("geo", a_geo), ("utm", a_utm), ("deg", a_deg)):
    print(name, round(a), f"{(a / a_geo - 1) * 100:+.2f} %")
```

площадь контура границы рассчитана тремя способами (листинг 3): 1) геодезически на эллипсоиде WGS84 (метод polygon_area_perimeter класса Geod библиотеки pyproj, алгоритмы Ч. Карни [18]) — эталон A_0; 2) на плоскости в UTM 35N по формуле Гаусса (реализована средствами NumPy [19]) для координат, преобразованных так же, как в модуле GeoProjector-BY, A_1; 3) на плоскости в градусах, принятых за равные единицы длины (1° = 111,195 км по обеим осям), A_2, что соответствует построению карты в градусах. Способ 3 не является геодезическим: он моделирует распространённую ошибку «наивного» построения сеточных карт, когда географические градусы подаются на вход интерполяции без предварительного перепроецирования. Площадь многоугольника и отклонение от эталона:

$$A = \frac{1}{2}\left|\sum_{i=1}^{n}(x_i\, y_{i+1} - x_{i+1}\, y_i)\right|,$$

$$\delta_j = \frac{A_j - A_0}{A_0} \cdot 100\,\%, \quad j = 1{,}2. \qquad (3)$$

Листинг 3 — Расчёт площади полигона границы тремя способами

Воспроизводимость и доступность данных. Исходная база данных «Буровая изученность Республики Беларусь» принадлежит ГП «НПЦ по геологии»; условия доступа к ней определяются держателем. Контур государственной границы (Natural Earth) [17] общедоступен. Алгоритмы подготовки данных приведены в листингах 1–3.

Результаты исследования и их обсуждение

Картометрическая проверка площади. Эталонная геодезическая площадь составила 207 499 км², что на 0,05 % отличается от официального значения 207,6 тыс. км² [20]; различие, вероятно, связано с генерализацией контура масштаба 1:10 000 000. В UTM 35N получено 207 459 км² (−0,02 %); тот же результат получен при пропуске контура через модуль GeoProjector-BY (1 173 записи, отбраковано 0). При построении в градусах как равных единицах площадь составила 347 714 км² (+67,6 %) (таблица 1). Площадь области, ограниченной нарисованной границей на рисунке 1, измеренная по пикселям и переведённая в километры по масштабу осей, подтвердила расчёты (расхождение с расчётом около 0,3 % в UTM и около 1,2 % в градусах).

Таблица 1.

Площадь Беларуси, рассчитанная разными способами

Способ расчёта	Площадь, км²	Отклонение от эталона, %
Геодезический, эллипсоид WGS84 (эталон)	207 499	—
Плоскость, UTM 35N (EPSG:32635)	207 459	−0,02
Плоскость, градусы как равные единицы	347 714	+67,6
По рисунку в UTM (масштаб осей UTM)	208 100	+0,3
По рисунку в градусах (масштаб по широте)	351 800	+69,5

Контур границы на рисунках 1а и 1б охватывает облако скважин, то есть координаты

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

в обеих системах согласованы с эталонным контуром. Следовательно, карта в градусах искажена не ошибкой координат, а выбором одинакового масштаба для градуса долготы и градуса широты; карта в UTM сохраняет форму территории и с точностью до 0,3 % её площадь.

Различие в 67,6 % не является ошибкой координат или вычислений: оно возникает при допущении, что градус долготы и градус широты имеют одинаковую длину. Для расстояний то же допущение даёт отношение $\ell_\varphi/\ell_\lambda \approx 1{,}66$–$1{,}7$ в пределах территории (66,8 км/° на широте 53,2° и около 65,6 км/° на широте 54°), поэтому расстояния вдоль параллелей в градусной сетке завышены, а при равном масштабе осей карта вытянута в этом же отношении.

Обсуждение

Выбор проекции. Искажения длин в UTM 35N не превышают 0,16 %, а площадей лежат в пределах от −0,08 до +0,32 % (раздел 2.4); для региональной карты и для сопоставления моделей это пренебрежимо мало по сравнению с искажениями градусной сетки (до +67,6 % по площади). Для проектных расчётов на отдельном объекте UTM-координаты следует уточнять по данным съёмки и приводить к местной системе координат.

Происхождение различия в 67,6 %. Оно является следствием допущения о равенстве длин градуса по широте и долготе, а не ошибкой данных: карта в градусах при равном масштабе осей корректна как схема географических координат, но непригодна для измерения длин, площадей и уклонов.

Ограничения

(1) Принято, что архивные координаты заданы в WGS84; при иной исходной системе требуется дополнительное преобразование датума. (2) Обратное преобразование UTM → WGS84 подтверждает внутреннюю согласованность вычислений, но не точность исходных координат. (3) Эталонный контур Natural Earth масштаба 1:10 000 000 генерализован, что, вероятно, объясняет различие геодезической площади и официального значения порядка 0,05 %. (4) Порог 3×IQR для отметок может срезать реальные экстремумы рельефа; его применение зависит от задачи. (5) Погрешность отметок устьев скважин в архиве не оценивалась. (6) Влияние выбора системы координат на интерполированную поверхность и объёмные оценки в настоящей части не рассматривается; оно исследуется во второй и третьей частях.

Выводы и предложения. Разработан и описан модуль GeoProjector-BY (Python, pandas, pyproj), автоматизирующий чтение файлов .dat, .csv и .txt, исправление инверсии осей, контроль рамок, диапазона отметок и выбросов (3×IQR) и перепроецирование координат WGS84 → UTM 35N (EPSG:32635); параметр always_xy=True предотвращает молчаливую подмену осей.

Искажения UTM 35N на территории Беларуси не превышают 0,16% по длинам и лежат в пределах от −0,08 до +0,32% по площадям, что допустимо для региональной карты и недостаточно для проектирования на отдельном объекте без уточнения.

Площадь Беларуси в UTM 35N (207 459 км²) отличается от геодезической на эллипсоиде WGS84 (207 499 км²) на −0,02%, а при построении в градусах с равным масштабом осей завышена на +67,6%; отношение длин градуса по широте и долготе на территории составляет 1,66–1,7.

Описана подготовка контура государственной границы в формате.bln в градусах и в UTM, обеспечивающая сопоставимость сеток, построенных в двух системах координат.

Предложения: (1) перед построением любых сеточных моделей по скважинным данным в географических координатах выполнять перепроецирование в метрическую систему с контролем осей, рамок и выбросов; (2) при публикации карт в градусах указывать неравенство масштабов по осям и не использовать их для измерений; (3) для проектных работ выполнять уточнение по данным съёмки в местной системе координат.

Полученные результаты служат основой для второй части работы, в которой модели рельефа, построенные в двух системах координат, сопоставляются между собой и с независимым эталоном, а перевод высотной погрешности в погрешность объёма вскрыши и уклонов выполняется в третьей части.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Guth, P. L., Van Niekerk, A., Grohmann, C. H., et al. (2021). Digital elevation models: Terminology and definitions. Remote Sensing, 13(18), Article 3581. https://doi.org/10.3390/rs13183581
[2] Матвеев, А. В., Гурский, Б. Н., & Левицкая, Р. И. (1988). Рельеф Белоруссии. Университетское.
[3] Snyder, J. P. (1987). Map projections—A working manual (U.S. Geological Survey Professional Paper 1395). U.S. Geological Survey.
[4] Iliffe, J., & Lott, R. (2008). Datums and map projections for remote sensing, GIS and surveying (2nd ed.). Whittles Publishing.
[5] Bivand, R. S., Pebesma, E. J., & Gómez-Rubio, V. (2013). Applied spatial data analysis with R (2nd ed.). Springer.
[6] Lovelace, R., Nowosad, J., & Muenchow, J. (2019). Geocomputation with R. CRC Press.
[7] Pebesma, E. (2018). Simple features for R: Standardized support for spatial vector data. The R Journal, 10(1), 439–446. https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009
[8] Li, J., & Heap, A. D. (2011). A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. Ecological Informatics, 6(3–4), 228–241. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.12.003
[9] Hengl, T., Nussbaum, M., Wright, M. N., et al. (2018). Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables. PeerJ, 6, Article e5518. https://doi.org/10.7717/peerj.5518
[10] Sekulić, A., Kilibarda, M., Heuvelink, G. B. M., et al. (2020). Random forest spatial interpolation. Remote Sensing, 12(10), Article 1687. https://doi.org/10.3390/rs12101687
[11] Airbus Defence and Space. (2024). Copernicus digital elevation model: Product handbook (Issue 5.0). https://dataspace.copernicus.eu/sites/default/files/media/files/2024-06/geo1988-copernicusdem-spe-002_producthandbook_i5.0.pdf
[12] Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., et al. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. Environmental Research Letters, 17(2), Article 024016. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f
[13] Оника, С. Г., Нарыжнова, Е. Ю., & Бильдюк, Е. В. (2023). Геоинформационные системы в горном деле: Электронный учебно-методический комплекс. БНТУ.
[14] McKinney, W. (2010). Data structures for statistical computing in Python. In Proceedings of the 9th Python in Science Conference (pp. 56–61). https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a
[15] Whitaker, J. (n.d.). pyproj: Python interface to PROJ (cartographic projections and coordinate transformations library) [Computer software]. GitHub. https://github.com/pyproj4/pyproj
[16] Šavrič, B., Patterson, T., & Jenny, B. (2019). The Equal Earth map projection. International Journal of Geographical Information Science, 33(3), 454–465. https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1504949
[17] Natural Earth. (n.d.). Admin 0—Countries, 1:10m [Geospatial dataset]. GitHub. https://github.com/nvkelso/natural-earth-vector
[18] Karney, C. F. F. (2013). Algorithms for geodesics. Journal of Geodesy, 87(1), 43–55. https://doi.org/10.1007/s00190-012-0578-z
[19] Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., et al. (2020). Array programming with NumPy. Nature, 585(7825), 357–362. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2
[20] Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. (б. д.). Географическое положение Республики Беларусь. https://www.minpriroda.gov.by/uploads/files/000585_597651_1.pdf

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 4
2026

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Бильдюк, Е. В., Носуля, И. Е., & Разводовский, А. А. (2026). Автоматизация перепроецирования координат скважин и проверка цифровой модели рельефа Беларуси. Часть 1: Подготовка данных, модуль GeoProjector-BY и картометрическая оценка. Цифровые технологии в промышленности, 4(4). https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.4.2026.7