

ГЕОДЕЗИЯ

УДК 004.942:528.2/.3

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-90-95

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СЕТИ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

П.С. ДОЛГИЙ, А.С. ИВАШНЁВА

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье описаны процесс и результаты геодинимического исследования на основе данных спутниковой сети точного позиционирования Республики Беларусь, проведенного в рамках выполнения гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований. Описан алгоритм трансформирования координат двух эпох к начальной эпохе наблюдений. Даны формулы вычисления компонентов деформаций (дилатация, сдвиг, направление и величина максимального и минимального растяжений) на основе тензора деформаций. Описана методика построения деформационных карт и представления их в среде веб-ГИС-проекта. Приведены результаты анализа вновь построенных деформационных карт для таких тектонических структур как Припятский прогиб, Белорусская антеклиза, Микашевичско-Житковичский выступ, Брестская впадина, Латвийская седловина, Оршанская впадина. В результате подтверждена активность некоторых разломных структур на территории Беларуси.

Ключевые слова: ГИС-проект, геодинамика, повторные наблюдения, компоненты деформации, представление геодинимических явлений в ГИС, генератор геометрии QGIS.

Введение. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Х24М-049 от 02.05.2024). Авторами статьи в 2020 году уже выполнялись исследования геодинимических движений по данным спутниковой сети точного позиционирования Республики Беларусь (далее – ССТП РБ). Предыдущая работа охватила эпохи от начала действия станций ССТП РБ (2014–2017 гг.) по 2020 г. В рамках настоящего исследования закуплены данные в формате `gipex` на эпохи 2021–2025 годов. Также привлекались свободно распространяемые данные Европейской сети постоянно действующих пунктов (EPN), в которую на территории Беларуси включены 11 пунктов¹.

Обработка данных осуществлялась в программном комплексе Trimble Business Center (TBC) и включала в себя импорт данных из формата `gipex`, выбор необходимых базовых линий, обработку базовых линий, уравнивание с фиксацией одной из станций. В результате получены отчеты об уравнивании сети на каждую эпоху в формате `html`-документа. Такой формат неудобен для анализа, поэтому был разработан модуль `tbc_parser` на языке программирования `python`, который извлекает данные из `html`-документов и выполняет их дальнейшую обработку: трансформирование координат и вычисление компонентов деформаций.

В результате обработки ГНСС-измерений на две эпохи получают плановые координаты в двух независимых системах, следовательно, возникает задача трансформирования (преобразования) координат. Координаты для двух исследуемых эпох преобразуются по отношению к начальной эпохе (в нашем случае – начало действия станций ССТП РБ). Для этого необходимо выполнить две независимые операции: определить преобразующие коэффициенты (параметры) на основании общих точек; преобразовать координаты точек, координаты которых известны лишь в одной системе координат.

Основная часть. В нашем случае использовалась твердотельная модель преобразования, которая предусматривает равномерный разворот всех точек на угол φ и сдвиг их по осям на величины t_x и t_y .

Твердотельную модель преобразования можно описать формулами:

$$\begin{aligned} X_n &= X_c \cdot \cos\varphi - Y_c \cdot \sin\varphi + t_x; \\ Y_n &= X_c \cdot \sin\varphi + Y_c \cdot \cos\varphi + t_y, \end{aligned} \quad (1)$$

где t_x и t_y – сдвиги по осям;

φ – угол поворота (элементы преобразования);

X_c, Y_c – координаты в старой системе координат;

X_n, Y_n – координаты в новой системе координат.

На основе формул (1), имея общие точки, координаты которых известны в обеих системах координат, можно определить преобразующие коэффициенты. Очевидно, что для однозначного определения параметров

¹ EUREF Permanent GNSS Network. URL: https://epncb.oma.be/_networkdata/stationlist.php.

преобразования между двумя отдельными системами координат достаточно иметь количество уравнений, равное количеству неизвестных параметров. В твердотельной модели три неизвестных параметра, следовательно, для однозначного решения достаточно двух общих точек. Однако для контроля и оценки точности берется избыточное число точек, что приводит к переопределенной системе (1).

Для получения преобразующих коэффициентов переопределенную систему (1) возможно решить различными способами на основе метода наименьших квадратов. Один из них известен как «метод растягивания». Запишем переопределенную систему (1) в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} (Y_c)_1 - (Y_n)_1 \\ (X_c)_1 - (X_n)_1 \\ (Y_c)_2 - (Y_n)_2 \\ (X_c)_2 - (X_n)_2 \\ \dots \\ (Y_c)_n - (Y_n)_n \\ (X_c)_n - (X_n)_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (X_c)_1 & 1 & 0 \\ -(Y_c)_1 & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ (X_c)_n & 1 & 0 \\ -(Y_c)_n & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi \\ t_x \\ t_y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

или в свернутом виде:

$$K_n = A \cdot k, \quad (3)$$

где A – матрица плана;
 k – вектор коэффициентов.

Для получения решения запишем уравнение поправок для переопределенной системы (3):

$$v = A \cdot \hat{k} - K_n. \quad (4)$$

На основе условия метода наименьших квадратов $v^T v = \min$ переходим к совместной системе нормальных уравнений

$$\begin{aligned} A^T A \cdot \hat{k} &= A^T \cdot K_n; \\ N \cdot \hat{k} &= f, \end{aligned} \quad (5)$$

где N – матрица коэффициентов нормальных уравнений;
 f – вектор свободных членов системы нормальных уравнений.
Итеративное решение системы (6) методом обращения дает

$$\hat{k} = (A^T A)^{-1} A^T \cdot K_n, \quad (6)$$

где $Q = (A^T A)^{-1} = N^{-1}$ – обратная весовая матрица вектора уравненных параметров.
Для оценки точности вычислим стандартное отклонение модели преобразования:

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{v^T v}{n-k}}, \quad (7)$$

где n – количество уравнений;
 k – количество определяемых параметров.

Для оценки точности уравненных величин (коэффициентов и координат в новой системе) необходимо определить корреляционные матрицы данных величин. Корреляционные матрицы для уравненных параметров (9) и уравненных координат точек в новой системе координат (10):

$$K_k = \hat{\sigma}_0^2 \cdot Q; \quad (8)$$

$$K_f = \hat{\sigma}_0^2 \cdot A Q A^T. \quad (9)$$

Извлекая корень из диагональных элементов корреляционных матриц, получаем средние квадратические ошибки для соответствующих величин [1].

По трансформированным координатам производится вычисление компонентов деформаций. Компоненты деформаций – безразмерные величины, характеризующие изменение конфигурации плоского объекта. К ним относят:

- дилатацию – показывает относительное изменение площади треугольника, обозначается буквой Q ;
- максимальный сдвиг – показывает относительный сдвиг центра треугольника, обозначается γ_m ;
- величины (E_1, E_2) и направление (φ_1, φ_2) максимального и минимального растяжений – показывают отношение длин отрезков E_1, E_2 , расположенных в направлениях φ_1, φ_2 , во вторую эпоху к длине в первую эпоху.

На вход программы, помимо координат на две эпохи, необходимо подать конфигурацию сети – какие станции относятся к каким треугольникам. В нашем случае ввод конфигурации реализован через полигональный шейп-файл. Расчет компонентов деформаций осуществляется для тех треугольников, для которых имеются данные на начальную, а также две исследуемые эпохи.

Расчет компонентов деформации осуществлялся путем составления системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned}\Delta X_1 &= X_1 e_{11} + Y_1 e_{12} + a; \\ \Delta Y_1 &= X_1 e_{21} + Y_1 e_{22} + b; \\ \Delta X_2 &= X_2 e_{11} + Y_2 e_{12} + a; \\ \Delta Y_2 &= X_2 e_{21} + Y_2 e_{22} + b; \\ \Delta X_3 &= X_3 e_{11} + Y_3 e_{12} + a; \\ \Delta Y_3 &= X_3 e_{21} + Y_3 e_{22} + b,\end{aligned}\tag{10}$$

где a, b – величины перемещения по осям X, Y ;

X_i, Y_i – значения координат в узлах треугольника.

На основании использования теории малых деформаций, метода конечных элементов и модели локально-однородного деформирования, полученной по данным о современных горизонтальных движениях земной коры, деформации характеризуются с помощью тензора (2).

$$|T_{ij}| = \begin{vmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{vmatrix},\tag{11}$$

где e_{ij} – компоненты тензора, относящиеся к центру треугольника.

Используя различные сочетания компонентов тензора деформации, определяются компоненты деформации по формулам [2]:

$$Q = e_{11} + e_{22};\tag{12}$$

$$E_1 = \frac{Q}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + (e_{12} + e_{21})^2};\tag{13}$$

$$E_2 = \frac{Q}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + (e_{12} + e_{21})^2};\tag{14}$$

$$\gamma_m = E_1 - E_2 = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2},\tag{15}$$

где γ_m – максимальный сдвиг;

$\gamma_1 = (e_{11} - e_{22})$ и $\gamma_2 = (e_{12} + e_{21})$ – компоненты сдвига вдоль осей координат.

С использованием компонентов сдвига вычислены направления главных осей деформаций ϕ_{E_1}, ϕ_{E_2} :

$$\phi_{E_1, E_2} = \frac{1}{2} \arctg\left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right) + A^0.\tag{16}$$

Для однозначного определения ϕ руководствуемся следующим правилом: если $\gamma_1 > 0$, то $A=90^\circ$, если $\gamma_1 < 0$, то $A=0^\circ$.

Вычисленные компоненты деформаций сохраняются в виде атрибутивной таблицы в полигональный шейп-файл с треугольниками ГНСС-сети. Геометрия треугольников копируется из входного файла конфигурации сети.

По результатам вычисления компонентов деформаций построены тематические карты: дилатации, сдвига, максимального и минимального растяжений.

Для построения тематических карт необходимо определить условные знаки для отображения геодинамических явлений и настроить соответствующие им стили в программном комплексе QGIS.

Дилатация и деформация сдвига отображаются с помощью изолиний, построенных методом многоуровневой сплайновой интерполяции. Для дилатации изолинии стилизуются с помощью цветовой шкалы: положительные значения отображаются красным цветом, отрицательные – синим, нулевые – зеленым. Направления максималь-

ного и минимального растяжений отображаются взаимно перпендикулярными стрелками соответствующего направления и пропорциональной длины с подписями значений. Для автоматизации построения деформационных карт растяжения разработана модель геообработки в редакторе моделей QGIS. Для построения карты необходимо выбрать файл с треугольниками и задать местоположение выходных файлов. В процессе работы модели создаются точечные слои, необходимые для подписи значений максимального и минимального растяжений. К построенной карте добавляются дополнительные слои, такие как тектонические разломы и границы тектонических структур. Готовая карта передается по протоколу WMS с помощью QGIS Server на клиентское веб-приложение (рисунок 1).

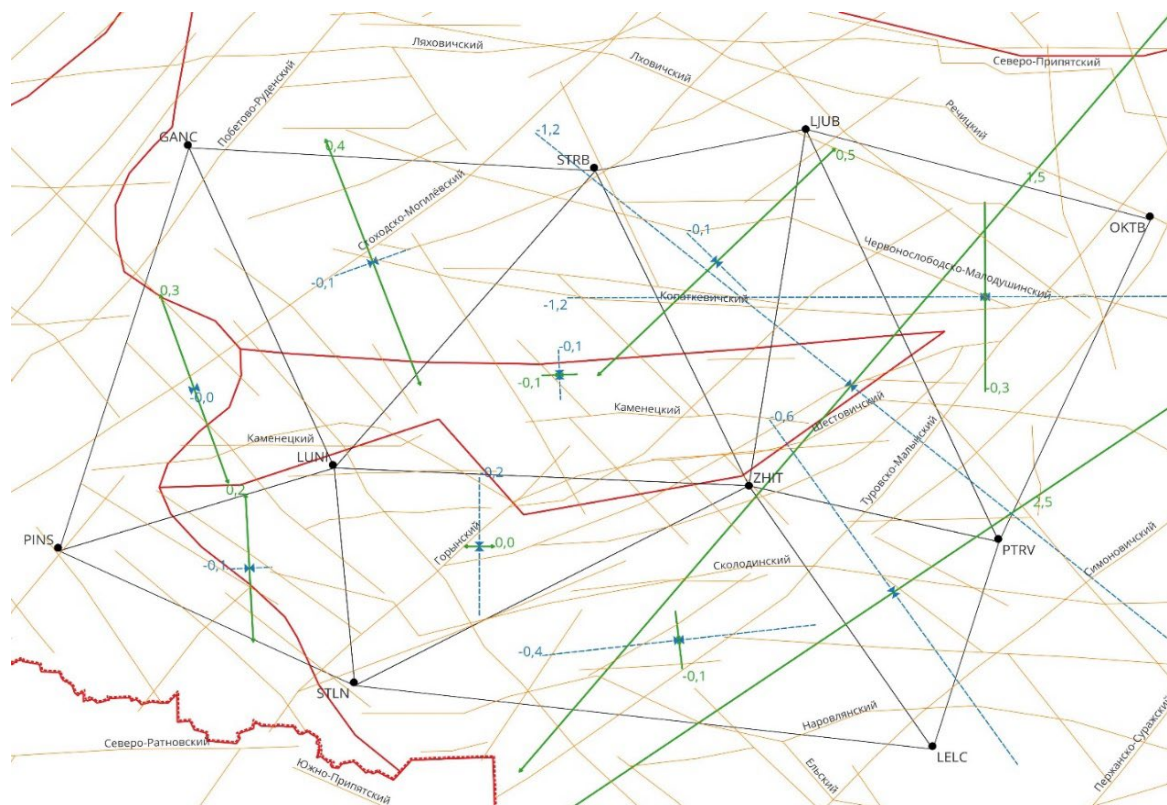


Рисунок 1. – Пример карты деформаций сдвига в среде веб-ГИС-проекта. Житковичский полигон, эпоха 2024–2025 гг.

По имеющимся данным были построены карты деформаций на каждую эпоху, а также итоговые карты между первой и последней эпохами. Анализируя деформационные карты на каждую из эпох, можно заметить, что направления максимального и минимального растяжений от эпохи к эпохе меняются на перпендикулярные, а дилатация меняется с положительной на отрицательную. Это может говорить о влиянии ошибок измерений на изменение координат станций сети. С целью выявить результирующие изменения построены карты между первой и последней эпохами наблюдений.

Гомельский полигон практически полностью находится в пределах Припятского прогиба – относительно молодой тектонической структуры с выраженной современной динамикой. На востоке также попадает на территорию Воронежской антеклизы, на севере – на Жлобинскую седловину и Бобовнянский выступ белорусской антеклизы. Полигон представляет интерес, т.к. расположен в наиболее промышленно освоенном регионе. На данной территории добывается нефть, калийные и каменные соли.

В целом для Гомельского полигона выявлена высокая активность, наибольших величин достигающая в треугольниках Калинковичи – Светлогорск – Речица, Светлогорск – Жлобин – Речица, Хойники – Лоев – Речица, Добруш – Лоев – Речица, Бобруйск – Жлобин – Светлогорск, Бобруйск – Довск – Жлобин (Северо-Припятский, Речицкий, Лоевский разломы). Максимальное растяжение в самые активные эпохи тяготеет к направлению юго-запад – северо-восток. Дилатация во все эпохи распределена неравномерно. Наибольший градиент дилатации наблюдается в северо-восточных треугольниках полигона, образованных станциями Жлобин, Бобруйск, Довск, Чечерск, Речица. Эти пункты опрашивают северную границу Припятского прогиба, Северо-Припятский, Кошелевский, Малиновско-Глазовский разломы.

Житковичский полигон охватывает такие структуры как западная часть Припятского прогиба, Микашевичско-Житковичский выступ, восточная часть Полесской седловины. В промышленном отношении в данном регионе добывается строительный камень. Представляет интерес Стоходско-Могилевский разлом, пересекающий полигон в направлении с юго-запада на северо-восток.

В целом Житковичский полигон характеризуется невысокой активностью по сравнению с Гомельским. В отдельные эпохи активность проявили треугольники Старобин – Любань – Житковичи и Житковичи – Петриков – Лельчицы (максимальное растяжение $0,6 \cdot 10^{-7}$). Дилатация в эпохи после 2020 года распределена неравномерно, наибольший градиент наблюдается в восточной части полигона (станции Любань, Октябрьский, Петриков, Житковичи). Восточные треугольники опрашивают такие структуры как восточный склон Микашевичско-Житковичского выступа, Червонослободско-Малодушинский, Копаткевичский разломы. Величина сдвига не превышает $1,0 \cdot 10^{-7}$, за исключением эпохи 2024–2025 годов, в которую в восточной части величина сдвига достигает $3,0 \cdot 10^{-7}$. Треугольники, опрашивающие Стоходско-Могилевский разлом, не показали его высокой активности.

Брестский полигон расположен на территории Брестской впадины, Луковско-Ратновского горста. Интерес представляют Южно-Ратновский и Северо-Ратновский разломы, являющиеся продолжением молодой структуры – Припятско-Донецкого грабена. В промышленном отношении интерес представляют участки нефтепроводов и газопроводов.

Брестский полигон характеризуется достаточно высокой активностью. Дилатация распределена равномерно и за исключением эпох 2018–2019, 2021–2022, 2023–2024 имеет тенденцию к увеличению в направлении с юго-запада на северо-восток. Сдвиг распределен неравномерно. Максимальный градиент приурочен к северной части полигона (станции Берёза, Ивацевичи, Телеханы, Дрогичин, Пружаны). В эпоху 2018–2019 величина максимального сдвига достигает $7,0 \cdot 10^{-7}$, а величина максимального и минимального растяжений $2,1 \cdot 10^{-7}$ и $-5,4 \cdot 10^{-7}$ соответственно. Полагаем, что активность приурочена к Каменецкому, Ляховичскому, Берестовицкому разломам.

Островецкий полигон расположен в пределах Белорусской антеклизы. Территорию пересекают Ошмянский, Островецкий, Мядельский разломы. В пределах полигона располагается эпицентр исторической тектонической активности – Гудогайского землетрясения 1908 года. Безусловно, интересным в промышленном отношении является объект повышенной опасности – Белорусская АЭС.

Островецкий полигон характеризуется значительной активностью. Величина дилатации треугольников, пересекаемых Ошмянским разломом, в отдельные эпохи достигает $1,6 \cdot 10^{-7}$. Прослеживается тенденция к образованию локальных максимумов и минимумов в районе Сморгони. Сдвиг в отдельные эпохи достигает $3,5 \cdot 10^{-7}$. Белорусская АЭС находится в зоне действия этих деформаций. Однако следует учесть, что, во-первых, на картах изолинии, проходящие в районе АЭС, показывают смоделированные интерполяцией модельные значения дилатации, а реальные значения могут отличаться; во-вторых, АЭС лежит в стороне от разрывных структур. В случае движения активных блоков земной коры, площадка АЭС будет двигаться вся целиком, что не вызовет её разрушений. Более того, АЭС спроектирована с большим запасом сейсмической прочности.

Полоцкий полигон находится в пределах Латвийской седловины, северного склона Белорусской антеклизы, западной части Оршанской впадины. Интерес представляют Полоцкий, Чашникский, Туровлянский, Бегомльский разломы. В промышленном отношении важными объектами являются Полоцкая и Витебская ГЭС, нефтепровод Унеча – Полоцк. Добыча полезных ископаемых в основном связана с приповерхностными отложениями четвертичного периода, а также с залежами доломитов девонского возраста в Витебском районе.

В целом Полоцкий полигон характеризуется невысокой активностью, выделяются только треугольники Бешенковичи – Витебск – Лиозно, Лиозно – Витебск – Городок, Городок – Витебск – Оболь, проявляющие активность во все эпохи. Считаем активность связанной с Руднянским и Витебским разломами. Значительные величины максимального и минимального растяжений встречаются также у треугольников Верхнедвинск – Россоны – Новополоцк и Верхнедвинск – Шарковщина – Новополоцк. Эти треугольники опрашивают Полоцкий разлом, активность которого ранее подтверждалась более детальными исследованиями [3].

Старобинский полигон охватывает часть Припятского прогиба севернее Микашевичско-Житковичского выступа. Станция Старые дороги принадлежит к Бобовнянскому выступу Белорусской антеклизы. Данная территория интересна в геодинамическом отношении, т.к., во-первых, имеет важнейшее промышленное значение: здесь расположено одно из крупнейших в мире месторождений калийных солей, во-вторых, здесь неоднократно наблюдались сейсмические явления техногенного характера.

По результатам исследований Старобинский полигон проявил невысокую активность со значениями дилатации, сдвига и растяжений, редко превышающими $1 \cdot 10^{-7}$. Дилатация и сдвиг распределены равномерно, направления растяжений варьируются от эпохи к эпохе.

Заключение. В ходе исследования были получены новые данные о деформациях земной коры и построены новые деформационные карты. Авторы применили не использовавшийся ими ранее при геодинамических исследованиях подход, предполагающий трансформирование координат по отношению к первой эпохе, для чего разработали собственный модуль. В результате выявлена активность ряда тектонических структур: Северо-Припятского, Кошелевского, Малиновско-Глазовского, Каменецкого, Ляховичского, Берестовицкого, Ошмянского, Островецкого, Мядельского, Руднянского, Витебского, Полоцкого разломы. Вместе с тем ряд разломов, активность которых подтверждалась более ранними исследованиями, не проявили ожидаемой активности: Стоходско-Могилевский, Выжевско-Минский. Для дальнейшего понимания механизмов движения пунктов ССТП РБ необходимо детализировать исследования с привлечением других типов данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дегтярев А.М., Ивашнева А.С. Анализ подходов к решению задачи трансформирования систем координат на основе разных представлений данных // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2020. – № 8. – С. 9–14.
2. Шароглазова Г.А. Применение геодезических методов в геодинамике: учеб. пособие. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – 192 с.
3. Шароглазова Г.А., Товбас С.К., Маркович К.И. Инструментальные исследования современной геодинамики в Полоцком регионе // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16. – С. 153–155.

REFERENCES

1. Degtyarev, A.M., & Ivashneva, A.S. (2020). Analiz podkhodov k resheniyu zadachi transformirovaniya sistem koordinat na osnove raznykh predstavleniy dannykh [Analysis of approaches to solving the problem of coordinate system transformation based on different data representations]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F. Civil engineering. Applied sciences]*, (8), 9–14. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Sharoglazova, G.A. (2002). *Primenenie geodezicheskikh metodov v geodinamike [Application of geodetic methods in geodynamics: A textbook]*. Polotsk State University. (In Russ.).
3. Sharoglazova, G.A., Tovbas, S.K., & Markovich, K.I. (2015). Instrumental'nye issledovaniya sovremennoy geodinamiki v Polotskom regione [Instrumental research of modern geodynamics in the Polotsk region]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F. Civil engineering. Applied sciences]*, (16), 153–155. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 27.03.2026

NEW RESULTS OF GEODYNAMIC STUDIES BASED ON DATA FROM THE SATELLITE-BASED PRECISE POSITIONING NETWORK OF THE REPUBLIC OF BELARUS

P. DOLHI, A. IVASHNEVA
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article describes the process and results of a geodynamic study based on data from the satellite-based precise positioning network of the Republic of Belarus, carried out under a grant from the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research. An algorithm for transforming coordinates from two observation epochs to the initial observation epoch is described. Formulas for calculating strain components (dilatation, shear, magnitude and direction of maximum and minimum extension) based on the strain tensor are given. The methodology for constructing deformation maps and presenting them within a web GIS project environment is described. The results of the analysis of newly constructed deformation maps for such tectonic structures as the Pripyat Trough, Belarusian Antecline, Mikashevichi-Zhitkovichi Horst, Brest Basin, Latvian Saddle, and Orsha Basin are presented. The study confirms the activity of certain fault structures on the territory of Belarus.

Keywords: *GIS project, geodynamics, repeated observations, strain components, representation of geodynamic phenomena in GIS, QGIS Geometry Generator.*