

Сравнительный анализ современной деформации и новейших движений земной поверхности на территории Украины

М. И. Орлюк¹, М. В. Ищенко², 2019

¹Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

²Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 23 мая 2019 г.

На сьогодні дані глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) широко використовують у сфері навігації, геодезії, картографії та у регіональних геодинамічних дослідженнях, зокрема моніторингу руху літосферних плит та ін. Подальший розвиток і створення локальних ГНСС-мереж, а також довготривале поповнення баз даних координат окремих станцій і швидкостей їх переміщення дають змогу отримати достовірну детальнішу інформацію про сучасну деформацію земної поверхні.

Розглянуто сучасну деформацію поверхні Землі за результатами аналізу даних ГНСС (ГАО НАН України) у зіставленні з даними щодо висот квазігеоїду УГК2012 і новітніх лінеamentних зон й розломів, а також пізньопліоцен-четвертинних вертикальних рухів земної кори. За результатами аналізу високоточних координат векторів зміщення перманентних ГНСС-станцій на території України отримано параметри деформації земної поверхні та виділено райони переважних величин стиснення—розтягнення і ліво-, правостороннього обертання земної поверхні, між якими можуть бути проведені межі вздовж новітніх лінеamentних зон і розломів. Районам переважного розтягу земної поверхні відповідають зони новітніх тектонічних підняттяв (Волинсько-Подільської та Приазовської височин) та максимальні амплітуди пліоцен-четвертинних рухів і позитивні аномалії геоїда, а районам переважного стиснення — зони тектонічних опускань (Поліська і Придніпровська низовини), мінімальних амплітуд пліоцен-четвертинних рухів та незначних висот геоїда. Виділено чотири великі сучасні геоблоки: Північно-Західний і Північно-Східний, які обертаються за годинниковою стрілкою, та Південно-Західний і Південно-Східний — проти годинникової стрілки. На якісному рівні запропоновано механізм взаємозв'язку сучасних і новітніх рухів земної кори. Він охоплює новітні зони тектонічних підняттяв і опускань з відповідними напруженнями і переміщеннями поверхні кори, на які накладаються сучасні напруження (і відповідні переміщення), що пов'язані з тектонічним рухом Євразійської плити у північно-східному напрямку та нерівномірним обертанням Землі.

Ключові слова: ГНСС-дані, сучасні та новітні рухи земної кори, лінеamenti, розломи, геоблоки, Україна.

Введение. Глобальные навигационные спутниковые сети (ГНСС) прочно вошли не только в повседневное использование в прикладной сфере навигации, геодезии, кадастре, картографии и т.д., но и получили широкий спектр распространения и использования в научной сфере. Примером могут служить исследования и мониторинг, проводимые по изучению движения

литосферных плит и процессов на планете, происходящих на их стыках [Argus et al., 2011; Ze et al., 2012; GPS and Tectonics¹].

Последующее развитие и создание локальных ГНСС-сетей, а также долгосрочное наполнение баз данных координатными решениями и оценками скоростей

¹ <https://spotlight.unavco.org/how-gps-works/gps-and-tectonics/gps-and-tectonics.html>

смещения ГНСС-станций позволило проводить геодинамические исследования и на локальном уровне [Hill, Blewitt, 2006; Марченко и др., 2011; Uzel et al., 2013; Devoti et al., 2014; Araszkiewicz et al., 2016; Ищенко, 2017; Тимофеев и др., 2019].

С 2012 г. на территории Украины резко увеличивается количество перманентных станций и к 2017 г. составляет более 180. Имеющееся расположение станций позволило создать достаточно густую сеть, а также получить высокоточные координаты и оценки скоростей ГНСС-станций, что дало возможность рассчитать параметры деформации земной поверхности. Основными параметрами являются эллипсы искривлений и вращения. Параметром деформации, характеризующим проявление сжатия или/и расширения земной поверхности, являются оси эллипса. Параметр вращения демонстрирует поступательно-вращательные движения отдельных геоблоков, которые могут быть вызваны их реакцией (откликом) на неравномерное вращение Земли.

Логично предположить, что современные движения и деформации земной поверхности должны унаследовать и быть своеобразным продолжением и отображением процессов, в результате которых сформировался современный рельеф. В свою очередь, движения и деформации формируются современными термодинамическими процессами в верхней мантии, которые определяют деформацию геоблоков земной коры, зависящей от ее геофизической, прежде всего, плотностной неоднородности. Характер современной деформации земной поверхности за счет внутренних (геодинамические процессы в верхней мантии) и внешних (неравномерность вращения Земли) причин зависит не только от плотностной неоднородности земной коры, но и от наличия современных субвертикальных и субгоризонтальных разломов и разломных зон (зон с пониженными прочностными свойствами), по которым возможны смещения и вращения ее отдельных геоблоков.

В связи с вышеизложенным в работе

выполнено сопоставление параметров деформации поверхности Земли, полученных из обработки ГНСС-наблюдений, с высотами квазигеоида УГК2012 (отображающими плотностную неоднородность и рельеф поверхности Земли), позднеплиоцен-четвертичными вертикальными движениями, а также с линеamentными зонами и разломами, которые отражают новейшие платформенные геоструктуры Украины и динамику их развития.

Обзор входных данных. Расчет параметров деформации земной поверхности с использованием наблюдений на ГНСС-станциях во многом зависит от их расположения друг от друга, а также от точности определения координат и скоростей их смещений. Для получения координатных решений и оценок скоростей ГНСС-станций были использованы программный комплекс «Bernese GNSS Software ver. 5.2» [Dach et al., 2015], который был разработан в Астрономическом институте Бернского университета (Швейцария), а также рекомендации Центрального бюро для Центров анализа ГНСС-наблюдений. Все координатные решения получены в системе координат IGB08 (координатная реализация Международной земной системы координат 2014)². Более детальное описание алгоритма обработки ГНСС-наблюдений и результаты приведены в работе [Хода, 2019].

Результаты размещены в открытом доступе в формате SINEX на ftp-сервере³ Центра анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины. Точность решений была оценена с помощью повторяемости координат [Khoda, 2017]:

- для северной компоненты — 1,69 мм,
- для восточной компоненты — 1,4 мм,
- для высотной компоненты — 3,63 мм

соответственно.

В целом полученные значения соответствуют по качеству комбинированным решениям, представленным Центром анализа Европейской перманентной сети

² <http://acc.igs.org/igs-frames.html>, <http://acc.igs.org/igs-frames.html>

³ <ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gnss/products/IGb08/>



Рис. 1. Плановая компонента векторов смещений ГНСС-станций на схеме географического районирования территории Украины: 1 — Вольно-Подольская возвышенность, 2 — Карпаты, 3 — Полесская низменность, 4 — Приднепровская возвышенность, 5 — Приднепровская низменность, 6 — Донецкий край, 7 — Приазовская возвышенность, 8 — Причерноморская низменность.

(EPN)⁴. Такая точность, а также достаточный период наблюдений (минимум три года [DeMets, 1994]) позволили оценить скорости смещения ГНСС-станций.

Для оценки векторов смещения ГНСС-станций и последующих расчетов параметров деформации земной поверхности было использовано 109 ГНСС-станций, 100 ГНСС-станций расположены на территории Украины, шесть — на территории Молдавии, две — на территории Польши и одна — на территории Румынии.

На рис. 1 представлена горизонтальная компонента векторов смещений для 109 ГНСС-станций (эпоха 2005,0).

Значения векторов смещения составляют следующие величины:

- минимальное — 2,18 см в год,
- максимальное — 2,9 см в год,
- среднее — 2,58 см в год.

⁴ http://www.epncb.oma.be/_productsservices/analysiscentres/combinedeurefresolution.php

Таблица значений северной и восточной компонент векторов смещений для 109 ГНСС-станций, полученных в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины, приведена в работе [Ishchenko, 2018].

Для сравнения направлений и величин векторов смещения ГНСС-станций приведены результаты по оценке векторов для территории Центральной Европы, полученные в рамках кампании CEGRN⁵ [Carofali, 2013; Stangl et al., 2014], рис. 2.

Сравнивая карты на рис. 1 и 2, можно видеть, что направления векторов движения соответствуют глобальному направлению движения Евразийской литосферной плиты для восточно-европейской ее части.

На рис. 1 видно, что текущая конфигурация ГНСС-сети (на 2017 г.) позволяет провести исследование по определению параметров деформации земной поверхности; перманентные станции распо-

⁵ <http://cegrn.cisas.unipd.it/CEGRN/index3.htm>

жены достаточно равномерно: расстояния между ними не превышают 70 км.

Для расчетов параметров деформации земной поверхности использовалось программное обеспечение «GeoStrain» [Goudarzi, 2015], входными данными служили координаты ГНСС-станций и величины их векторов смещения. Приведем ниже основные математические положения, использованные для расчета параметров деформации земной коры. Детальные выкладки приведены в работе [Goudarzi, 2015].

1. Бесконечно малое изменение положения в пластичном теле описывается теорией упругости и в первой степени приближения может быть записано суммой трех параметров: смещением $\mathbf{u}[T]$, расширением (дилатация) $\mathbf{u}[D]$ и вращением $\mathbf{u}[R]$. Используя теорему Тейлора, поле смещения $\mathbf{u}(x)$ можно записать так:

$$\mathbf{u}(x) = \mathbf{x}(t_2) - \mathbf{x}(t_1), \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(t_i)$ — вектор положения на момент времени t_i .

2. Линеаризуя и используя теорему Тейлора, а также правило суммирования Эйнштейна, (1) можно записать в следующем виде:

$$u_i(\mathbf{x} + d\mathbf{x}) = u_i(\mathbf{x}) + \left. \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right|_{\mathbf{x}} dx_k, \quad (2)$$

где $\mathbf{d}_{ik} = \left. \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right|_{\mathbf{x}}$ — тензор второго порядка в n -мерном пространстве, называемый тензором деформации.

3. Из теории тензорного исчисления известно, что любой тензор второго порядка может быть представлен как сумма симметричного и несимметричного тензоров. Применив эту концепцию к уравнению (2), получим [Wald, 1984; Peter, 2000]

$$\begin{aligned} u_i(\mathbf{x} + d\mathbf{x}) &= \\ &= u_i(\mathbf{x}) + \frac{d_{ik} + d_{ki}}{2} dx_k + \frac{d_{ik} - d_{ki}}{2} dx_k = \\ &= u_i^{[T]}(\mathbf{x}) + du_i^{[D]}(\mathbf{x}) + du_i^{[R]}(\mathbf{x}). \end{aligned} \quad (3)$$

Выражения с правой стороны (3) — это

смещение T , расширение (дилатация) D и вращение R соответственно. Тензор «напряжения» (англ. «strain» — «напряжение» в дальнейшем используется как «деформация») определяется симметричной частью тензора деформации, обозначенного как ε_{ik} [Peter, 2000]:

$$du_i^{[D]}(\mathbf{x}) = \frac{d_{ik} + d_{ki}}{2} dx_k = \varepsilon_{ik} dx_k.$$

4. Тензор вращения определяется несимметричной частью тензора деформации и записывается как векторное произведение бесконечно малой матрицы вращения и бесконечно малого вектора смещения dx_k [Hackl et al., 2009]:

$$du_i^{[R]}(\mathbf{x}) = \frac{d_{ik} - d_{ki}}{2} dx_k = \frac{\text{rot } u \cdot dx_k}{2},$$

который, как известно, равен бесконечно малому вращению ω_{ik} вектора dx_k вокруг оси на угол, равный $|\text{rot } u|/2$.

5. Тензор скорости деформации в сферической системе координат, например на поверхности Земли, может быть выражен в сферических координатах и их смещениях [Love, 1944; Savage et al., 2001; Wu et al., 2011] так:

$$\begin{cases} v_\varphi = \frac{1}{R} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi}, \\ v_{\varphi\lambda} = \frac{1}{2R} \left(\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} - v_\lambda \text{tg } \varphi + \frac{\partial v_\lambda}{\partial \lambda} \right), \\ v_\lambda = \frac{1}{R} \left(\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial v_\lambda}{\partial \lambda} + v_\varphi \text{tg } \varphi \right), \end{cases} \quad (6)$$

где φ и λ — сферические координаты, а v_φ и v_λ — скорости точек на поверхности, v_φ , v_λ и $v_{\varphi\lambda}$ — три независимых компоненты тензора скорости деформации.

В результате были рассчитаны два основных параметра — эллипсы искривления и вращение, а также два дополнительных параметра как производные от эллипсов искривлений: максимальное относительное смещение и площадь деформации. Эллипсы искривлений характеризуются максимальным/минимальным рас-



Рис. 2. Горизонтальная компонента векторов смещений ГНСС-станций для территории Центральной Европы, рассчитанная в рамках кампании SEGRN, система координат — IGB08.

ширением и сжатием по их осям (синим цветом принято обозначать расширение, красным — сжатие земной поверхности).

Параметр вращения характеризует поступательно-вращательные движения геоблоков (синим цветом обозначены секторы, характеризующие вращение против часовой стрелки, красным — по часовой).

Ниже приведены соответствующие минимальные, максимальные и средние величины параметров деформации (величина безразмерная) по осям эллипсов искривления и вращения.

Большая ось, $10 \cdot 10^{-9}$: от $-233,9$ до $5,9$, среднее — $8,3$.

Малая ось, $10 \cdot 10^{-9}$: от $-7,5$ до $197,3$, среднее — $92,6$.

Вращение по часовой стрелке, $10 \cdot 10^{-9}$: от $2,9$ до $96,9$, среднее — $36,1$.

Вращение против часовой стрелки, $10 \cdot 10^{-9}$: от -2 до -117 , среднее — 39 .

Сопоставление параметров деформации земной поверхности с «региональными» и «локальными» особенностями квазигеоида УКГ2012. Как было отмечено, современные перемещения и деформации поверхности Земли предопределяются, прежде всего, плотностными неоднородностями земной коры и верхней мантии, которые лучше всего проявляются в аномалиях гравитационного поля и разных его составляющих [Ентин и др., 2015]. Для территории Украины было выполнено моделирование высот квазигеоида на основе данных GPS-нивелирования, а также абсолютных и аномальных значений силы тяжести [Марченко и др., 2013]. Точность полученного квазигеоида УКГ2012 соста-

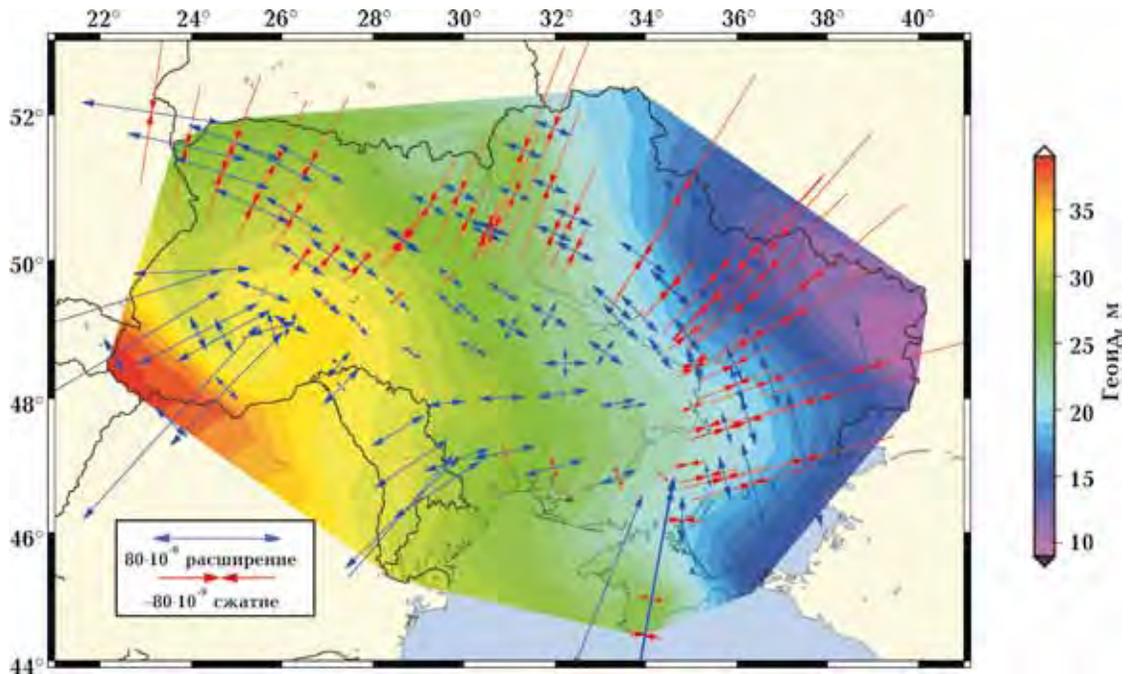


Рис. 3. Сравнительный анализ проявлений деформаций (эллипсы искривлений, синие стрелки — расширение, красные — сжатие) на примере «регионального» квазигеоида УКГ2012рег.

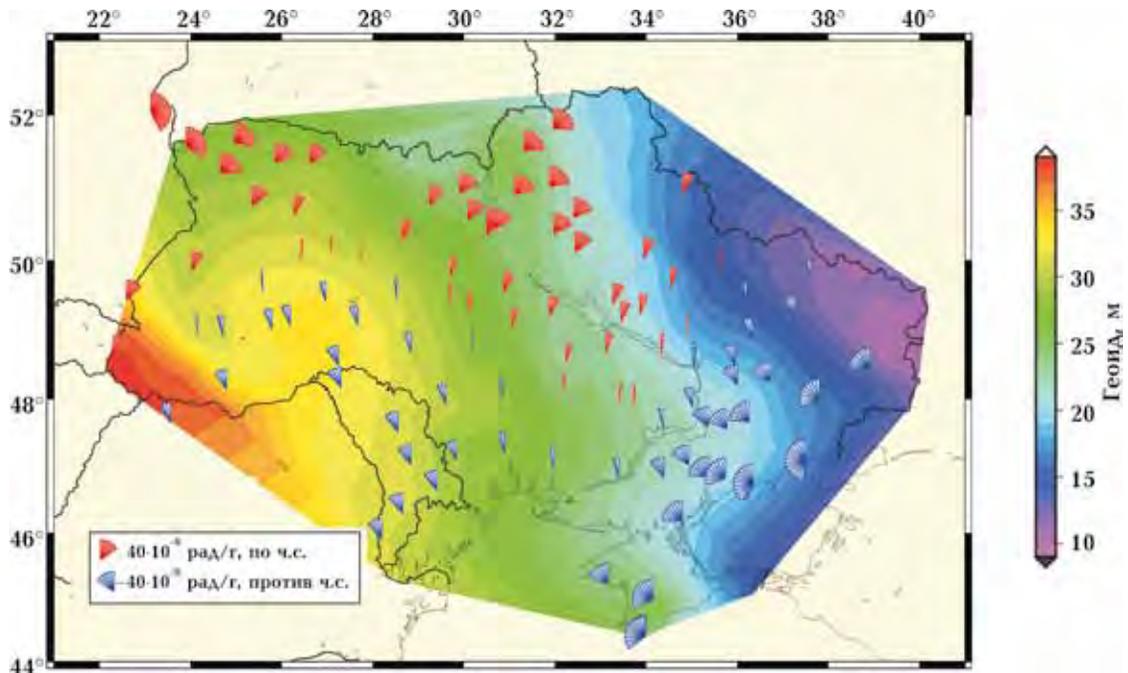


Рис. 4. Сравнительный анализ проявлений деформаций (вращения, красные радиусы по часовой стрелке, синие — против) на примере «регионального» квазигеоида УКГ2012рег.

вила менее 2 см относительно пунктов GPS-нивелирования I и II классов. Для дальнейшего анализа глубинных и приповерхностных источников аномалий квазигеоида УКГ2012 были выделены его

региональная (УКГ2012рег) и локальная (УКГ2012лок) составляющие. Региональная составляющая геоида была получена путем осреднения исходной модели с окном 100×100 км, а локальная — как

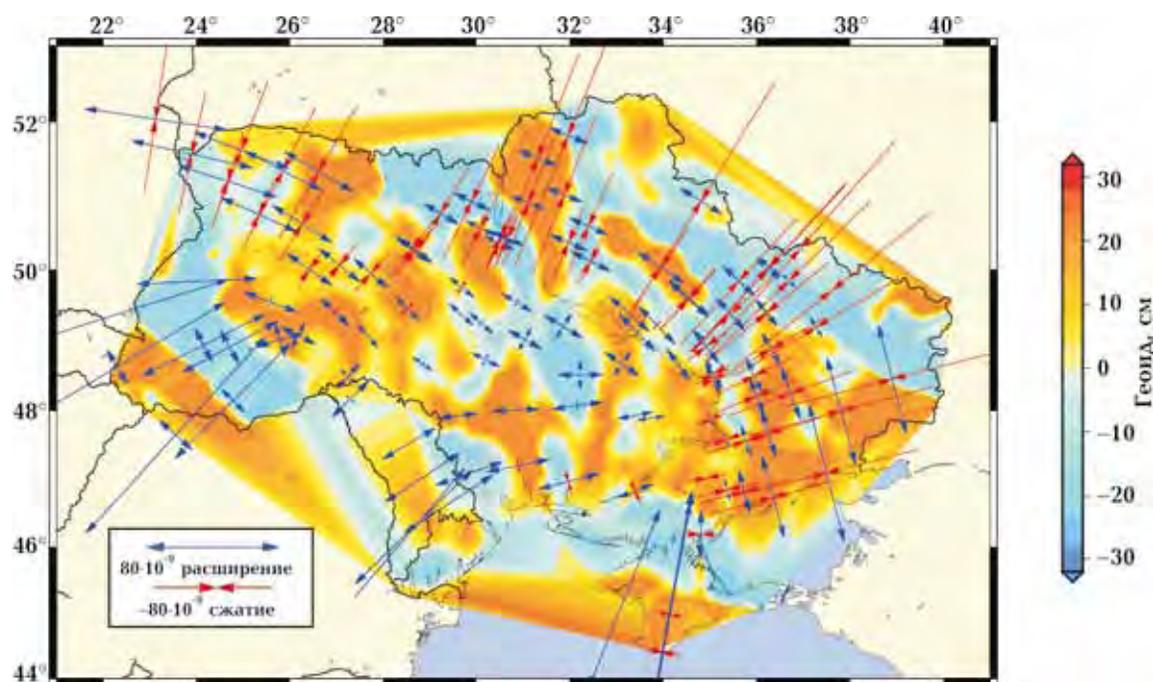


Рис. 5. Сравнительный анализ проявлений деформаций (эллипсы искривлений, синие стрелки — расширение, красные — сжатие) на примере «локального» квазигеоида УКГ2012лок.

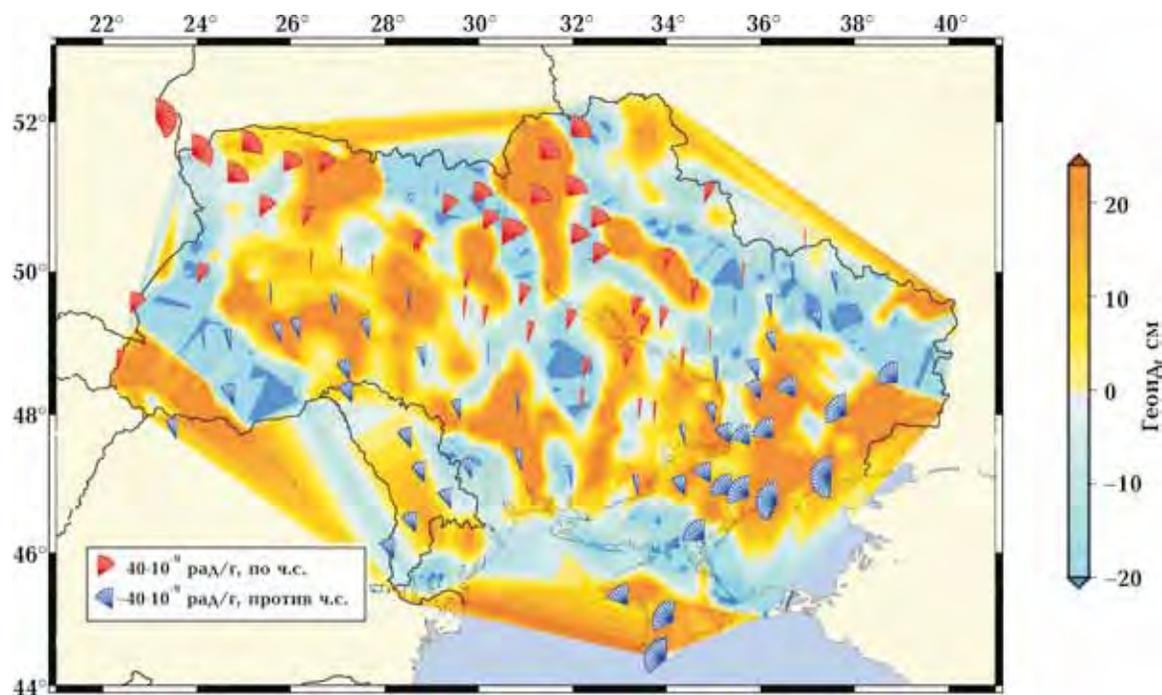


Рис. 6. Сравнительный анализ проявлений деформаций (вращения, красные радиусы — по часовой стрелке, синие — против) на примере «локального» квазигеоида УКГ2012лок.

разница между исходной и региональной моделями. Идея использования «регионального» и «локального» квазигеоидов состояла в получении аномалий высот, которые предопределяются глубинными

и приповерхностными плотностными неоднородностями без учета глобальной высотной модели [Ищенко, Орлюк, 2018].

Сравнительный анализ параметров деформации с «региональным» квазигеоидом.

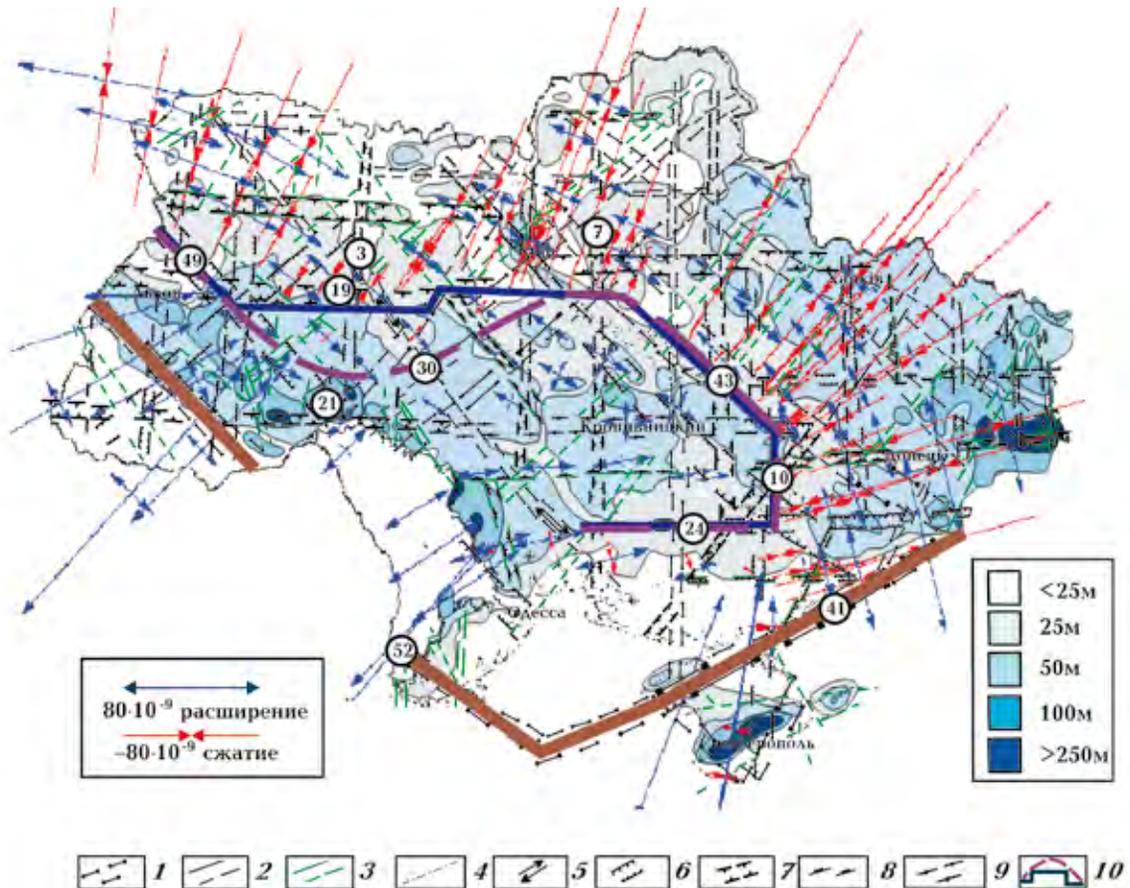


Рис. 7. Схема сопоставления аномалий деформаций поверхности Земли (эллипсов искривления) с новейшими движениями земной коры (составлена с использованием [Верховцев, 2008], для территории Закарпатья данные отсутствуют). Каркасные элементы линейментных зон: 1 — трансрегиональных, 2 — региональных 1-го порядка, 3 — то же 2-го порядка, 4 — одиночные линейменты; морфотипы линейментов: 5 — сдвиги, 6 — сбросы, 7 — взбросы, 8 — надвиги, 9 — раздвижки, 10 — варианты границ между областями преобладающего растяжения и сжатия земной поверхности.

Цифры в кружках — номера линейментных зон (сохранена авторская нумерация [Верховцев, 2008]): 49 — Сокальско-Одесская, 19 — Яворовско-Волчанская, 3 — Олевско-Мурованская, 7 — Щорсовско-Николаевская, 43 — Чернобыльско-Мариупольская, 21 — Мукачевско-Днепропетровская, 10 — Котелевско-Нижнесерогоская, 24 — Каховско-Бердянская, 30 — Могилев-Подольско-Шосткинская, 41 — Сивашско-Каркинитская, 52 — Старосамборско-Змеиная.

Максимум высот «регионального» геоида располагается на Вольно-Подольской возвышенности (ВПВ) и составляет примерно 33—34 м (рис. 3). В северном и северо-восточном направлениях от ВПВ наблюдается умеренное уменьшение высот геоида (до 27—20 м), а в восточном — минимальное (от 20—15 м). В центральных областях Украины высота геоида составляет от 30 до 20 м и до 10 м на восточной границе Украины и РФ.

Сопоставление высот поверхности «регионального» геоида с деформациями сжатия—растяжения земной поверхности по-

казывает, что для юга западной Украины, а также центральной и, частично, южных областей Украины наблюдается расширение по обоим направлениям осей эллипса (синие стрелки) (см. рис. 3). В первую очередь, это территории ВПВ (1), район Карпат (2) и восточная часть Приднепровской возвышенности (4), а также, частично, Причерноморская низменность (8).

Вокруг обозначенных территорий наблюдается своеобразная переходная зона — с примерно одинаковыми величинами расширения—сжатия, а на севере, северо-востоке и особенно востоке Украины

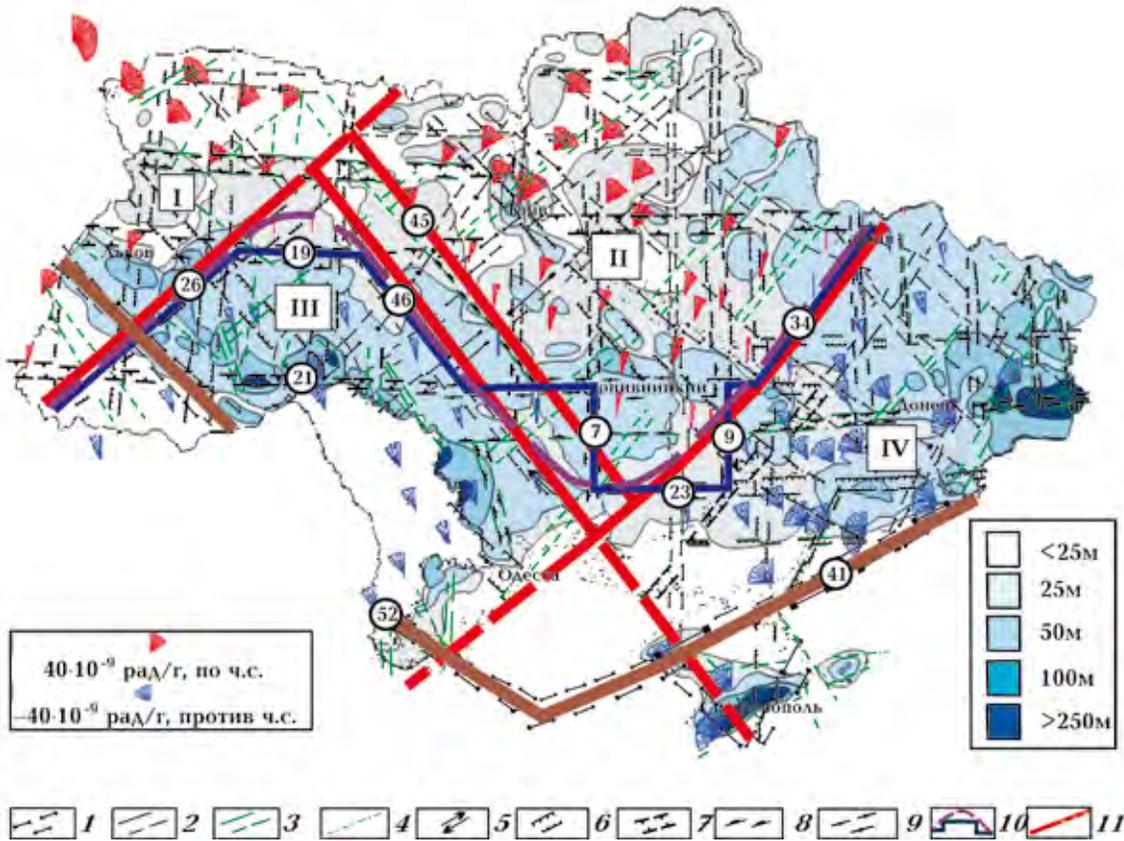


Рис. 8. Сопоставление аномалий деформаций поверхности Земли с новейшими движениями земной коры на примере вращения ее поверхности: 10 — варианты границ между областями лево- правостороннего вращения земной поверхности; 11 — предполагаемые границы между геоблоками земной коры. Цифры в кружках — номера линейчатных зон (сохранена авторская нумерация [Верховцев, 2008]): 26 — Хустско-Корецкая, 19 — Яворовско-Волчанская, 46 — Камень-Каширско-Ялтинская, 45 — Ракитно-Новоархангельская, 21 — Мукачевско-Днепропетровская, 7 — Щорсовско-Николаевская, 23 — Баштанско-Тельмановская, 9 — Дружбинско-Орджоникидзевская, 34 — Магдалиновско-Мерефская, 41 — Сивашско-Каркинитская, 52 — Старосамборско-Змеиная. Другие условные обозначения см. на рис. 7.

резко преобладают напряжения сжатия северо-восточного направления. Это территории Полесской (3) и Приднепровской (5) низменности, а также территории северо-западной части Приднепровской возвышенности (4), Донецкого кряжа (6) и Приазовской возвышенности (7).

На рис. 4 приведено сопоставление высотных величин «регионального» квазигеоида с параметром вращения, которое может характеризовать поступательно-вращательные движения отдельных морфоструктур. Как видно, на карте прослеживаются две отдельные морфоструктуры, имеющие вращение против часовой стрелки (синие радиусы). Первая из них

охватывает территории ВПВ, а также восточную часть Приднепровской возвышенности. Ко второй морфоструктуре можно отнести территории Донецкого кряжа и Приазовской возвышенности. Для первой морфоструктуры корреляция с направлением ее вращения проявляется с максимальными высотными значениями регионального геоида. В то же время для второй проявление возрастания высоты квазигеоида отсутствует, хотя можно отметить относительное повышение высот геоида на фоне резкого уменьшения его высот на юго-западе и северо-востоке (см. рис. 4).

Сравнительный анализ параметров ге-

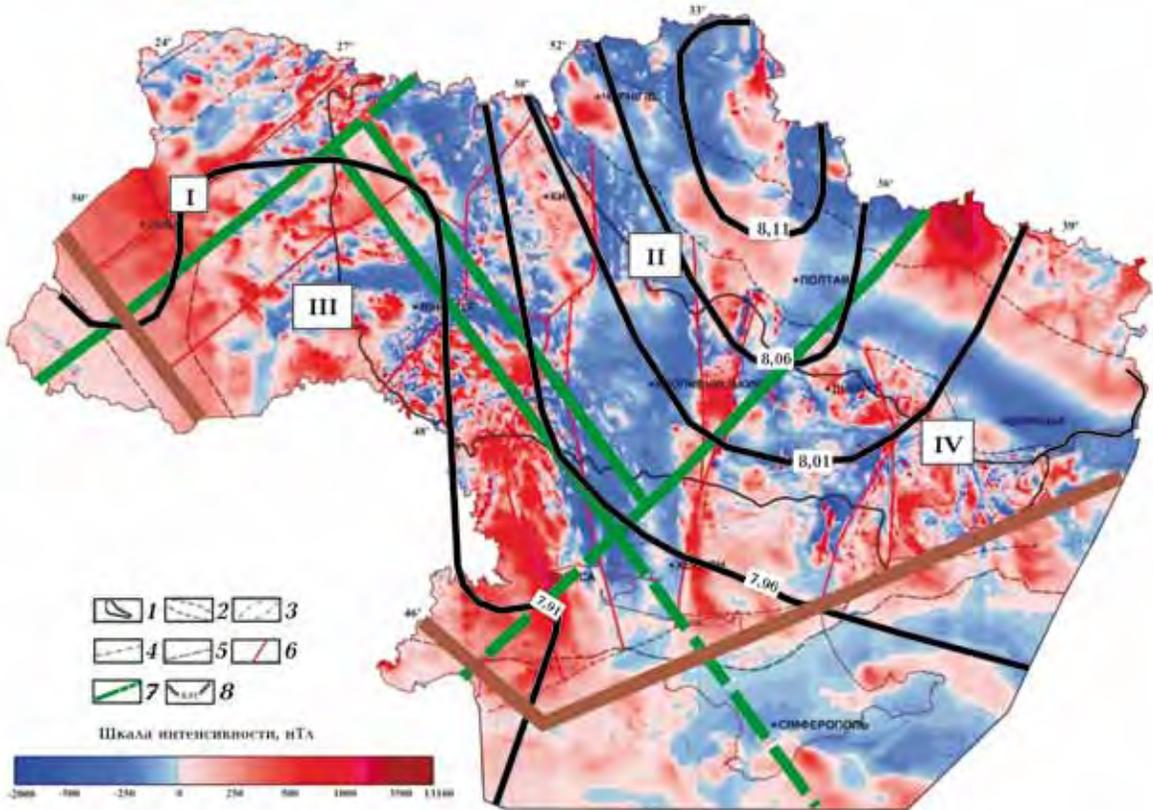


Рис. 9. Схема сопоставления современных геоблоков земной коры с геомагнитным полем ΔT (по [Орлюк и др., 2015; Orlyuk et al., 2018]) и скоростями продольных сейсмических волн на глубине 50 км (по [Гейко и др., 1998]): 1—5 — границы Украинского щита (1); Днепровско-Донецкого авлакогена (2); Вольно-Оршанского рифта (3); трансрегиональные линеаменты края Восточно-Европейского кратона (по [Верховцев, 2008]) (4); (по [Bogdanova et al., 2016]) (5); 6 — зоны межгеоблоковых разломов; 7 — границы сочленения современных геоблоков земной коры; 8 — скорости продольных сейсмических волн на глубине 50 км (по [Гейко и др., 1998]).

формации с «локальным» квазигеоидом. На рис. 5 представлены проявления высотных аномалий для «локального» квазигеоида.

Средние значения колебаний высот локальных особенностей УГК2012лок находятся в диапазоне от +25 до -15 см. Так, наиболее активные проявления аномалий можно выделить в ряд групп. К первой можно отнести территории ВПВ, восточной части Приднепровской возвышенности и частично Причерноморскую низменность.

Также можно выделить отдельный участок, характеризующийся подъемом более 25 см по высоте, охватывающий частично Киевскую и Черниговскую области. Величины «локального» геоида центральной части территории Украины составляют примерно от -5 до +10 см по высоте.

К третьей группе можно отнести уча-

сток, охватывающий территории Донецкого кряжа и Приазовской возвышенности.

Анализ результатов, представленных на рис. 5, показывает, что явной корреляции между процессами расширения—сжатия земной поверхности и высотными аномалиями «локального» квазигеоида не наблюдается.

Также было выполнено сопоставление остаточных высотных аномалий с параметром вращения (рис. 6).

Если для «регионального» квазигеоида УГК2012рег не прослеживались четкие взаимосвязи параметров вращения с остаточными высотными значениями (см. рис. 4), то для «локального» корреляция двух параметров прослеживается более четко.

В первую очередь, можно выделить первую условную морфоструктуру с терри-

ториями ВПВ, восточной частью Приднепровской возвышенности, а также, частично, территорией юго-западной Причерноморской низменности. Ко второй можно отнести территории Донецкого кряжа и Приазовской возвышенности.

Можно отметить, что эти две условные морфоструктуры, где происходит вращение против часовой стрелки, имеют четкую корреляцию с выявленными высотными аномалиями в «локальном» квазигеоиде.

Сопоставление параметров деформации земной поверхности с новейшими движениями земной коры. Для сопоставления и анализа были использованы результаты работы [Верховцев, 2008], в которой на основании морфоструктурного анализа топокарт, структурно-геологического дешифрирования разномасштабных фото- и космоматериалов детально рассмотрены новейшие линейные и кольцевые платформенные геоструктуры Украины, а также амплитуды позднеплиоцен-четвертичных вертикальных движений (ПЧВД) земной коры. Эти параметры новейших движений максимально приближены во временном интервале и предваряют современные движения поверхности Земли. Для корректного сопоставления современных и новейших движений земной поверхности была создана цифровая версия схемы новейших платформенных структур территории Украины, но в рамках разумного компромисса в данной статье ограничимся рассмотрением только линеаментных зон и ПЧВД.

Сопоставление параметров деформации земной поверхности с активными на современном этапе развития линеаментными зонами. В соответствии с работой [Верховцев, 2008], новейшие активные линеаментные системы образуют две доминирующие (ортогональная $0^\circ \div 90^\circ, \pm 5^\circ$ и диагональная $40^\circ \div 50^\circ \div 310^\circ \div 320^\circ$) и две диагональные подчиненные ($30^\circ \div 35^\circ \div 300^\circ \div 305^\circ$, и $65^\circ \div 70^\circ \div 335^\circ \div 340^\circ$) системы и представлены прямолинейными сопряженными и взаимно перпендикулярными отрезками доминирующих и подчиненных направлений (рис. 7, 8).

В связи с недостаточной дискретностью

как ГННС-станций, так и выделенных зон линеаментов, возможно проведение нескольких вариантов границ между областями преобладающих величин сжатия—расширения и лево-правостороннего вращения. В частности, область преобладающего сжатия земной поверхности может быть отделена от области ее преобладающего расширения следующими зонами линеаментов (с запада — на восток): (49) Сокальско-Одесской северо-западного простирания ($314^\circ \text{—} 316^\circ$, сброс), южному краю широтной (19) Яворовско-Волчанской ($89^\circ \text{—} 91^\circ$, взброс), а в районе субмеридиональной (7) Щорско-Николаевской зоны ($359^\circ \text{—} 1^\circ$, сбросо-взброс) поворачивает на юго-восток вдоль юго-западного края (43) Чернобыльско-Мариупольской зоны ($310^\circ \text{—} 320^\circ$, сбросо-сдвиг), далее в районе пересечения (21) Мукачевско-Днепропетровской зоны ($90^\circ \text{—} 91^\circ$, сброс) поворачивает на юг вдоль (10) Котелевско-Нижнесерогозской ($0^\circ \text{—} 3^\circ$, сброс) и, наконец, она может быть проведена в западном направлении по субширотной (24) Каховско-Бердянской зоне ($89^\circ \text{—} 90^\circ$, сброс) (см. рис. 7).

С учетом незначительной области очень слабых величин преобладающего сжатия земной поверхности в пределах севера Вольно-Подольской возвышенности граница может быть проведена по (49) Сокальско-Одесской зоне до пересечения с (3) Олевско-Мурованской субмеридиональной зоной, а дальше по (30) Могилев-Подольско-Шосткинской зоне северо-восточного простирания ($49^\circ \text{—} 52^\circ$, взбросо-сдвиг) до субширотной (19) Яворовско-Волчанской линеаментной зоны. Заметим, что в данном случае линия разделения может быть аппроксимирована синусоидой, образованной линиями северо-западного и северо-восточного простирания. Также отметим, что направление осей максимального сжатия в первом приближении перпендикулярны границе раздела этих областей: от северных направлений на северо-западе Украины до субширотных и широтных на востоке территории (см. рис. 7).

Для областей лево-, правостороннего вращения земной поверхности может быть предложена другая конфигурация области их сочленения. Линию сочленения можно провести по: (26) Хустско-Корецкому линеamentу северо-восточного простирания (47° — 50° , сбросо-сдвиг) — субширотной (19) Яворовско-Волчанской зоне (89° — 91° , взброс) — (46) Камень-Каширско-Ялтинской (314° — 325° , сдвиг-взброс — сброс) — субширотной (21) Мукачевско-Днепропетровской — субмеридиональной (7), Щорсовско-Николаевской (359° — 1° , сбросо-взброс) — субширотной (23) Баштанско-Тельмановской (90° — 91° , сброс) — субмеридиональной (9) Дружбинско-Орджоникидзевской (0° — 1° , сбросо-взброс) — (34) Магдалиновско-Мерефской (40° — 41° , сдвиг) северо-восточного простирания. Как и в предыдущем случае, зона сочленения может быть аппроксимирована синусоидой, градиентные зоны которой имеют северо-западное и северо-восточное простирание (см. рис. 8).

Следовательно, области как с разными величинами смещения, так и вращения, разделяются новейшими линеamentными зонами в основном северо-западного и северо-восточного простирания. В первом приближении в пределах территории Украины могут быть выделены четыре крупные современные морфоструктуры (геоблоки): Северо-Западный (I) и Северо-Восточный (II), вращающиеся по часовой стрелке, и Юго-Западный (III) и Юго-Восточный (IV) — против часовой стрелки. Эти геоблоки вычлняются (26) Хустско-Корецкой, (34) Магдалиновско-Мерефской линеamentными зонами северо-восточного простирания и (46) Камень-Каширско-Ялтинской северо-западного простирания. В связи с неопределенностью выделения зон сочленения геоблоков могут быть различные варианты их проведения. В частности, сочленение II и III геоблоков возможно по Ракитно-Новоархангельской (45) линеamentной зоне (см. рис. 8). Отметим, что направления простирания выделенных линеamentных зон хорошо увязываются с простиранием Старосамборско-Змеинового (52)

и Сивашско-Каркинитского (41) линеamentов, которые, с одной стороны, практически совпадают с юго-западным и южным ограничением Восточно-Европейского кратона, а с другой, являются фрагментами планетарных тектонолинеamentных зон мезокайнозойского этапа развития [Буш, 1983; Ломакин и др., 2018].

Следует обратить внимание, что интенсивность вращательных перемещений возрастает от зоны разделения к центральным частям морфоструктур (потенциальных геоблоков). Это может свидетельствовать о том, что причиной их вращения не является поворот одного из мегаблоков, так как в этом случае максимальные величины должны быть приурочены к самой зоне контакта. Следует отметить также тот факт, что зоны сочленения областей преобладающего сжатия—расширения и вращения по и против часовой стрелки находятся как бы в противофазе друг к другу (см. рис. 7, 8).

Сопоставление параметров деформации земной поверхности с амплитудами позднеплиоцен-четвертичных вертикальных движений земной коры. ПЧВД земной коры (менее 3,5 млн лет) являются последним этапом формирования современной ее поверхности и отображают новейшие движения этого временно-го интервала. В работе [Верховцев, 2008] показано, что ПЧВД имеют резко дифференцированный по площади характер проявления и весьма значительную интенсивность: значение суммарных амплитуд изменяется от -80 м в районе кос северного побережья Азовского моря и до $+700$ м в горном Крыму. В пределах платформенной Украины амплитуды варьируются от -80 м в ее центральной части до $+150$ ÷ 200 м в предгорье Крыма и Карпат, а также на Донбассе. Для Карпатского региона в связи с наличием сложных новейших процессов их развития, а также территории Молдавии данные отсутствуют. На рис. 7 и 8 амплитуды движений ПЧВД изображены интенсивностью цвета (чем насыщенней цвет, тем амплитуда выше).

На сравнительной карте (см. рис. 7)

ПЧВД и эллипсов искривления можно видеть, что в первом приближении минимальными величинами амплитуд вертикальных движений характеризуются северная часть Волыно-Подольи и северо-западная часть Днепровско-Донецкой впадины, которым соответствует область преобладающего сжатия земной поверхности, а Волинско-Подольской и частично Приднепровской возвышенностям с амплитудами 25—75 м — ее преобладающего расширения. Зона их разделения проходит примерно по (19) Яворовско-Волчанскому линеаменту. Следует отметить понижение амплитуд ПЧВД в зоне сочленения областей преобладающего сжатия и расширения земной поверхности на северо-востоке и востоке. Областям преобладающего сжатия земной поверхности северо-восточного и субширотного направления соответствуют территории Приазовской возвышенности, Донецкого кряжа и юго-восточной части Днепровско-Донецкой впадины с повышенными амплитудами ПЧВД.

Большей закономерностью отмечаются амплитуды ПЧВД с параметром вращения земной поверхности (см. рис. 8). Выделенные морфоструктуры III и IV, демонстрирующие вращение против часовой стрелки, наблюдаются в зонах, где амплитуда движений достигает значений 50 м и выше. В первую очередь, это территории ВПВ, Донецкого кряжа и Приазовской возвышенности.

Обсуждение результатов. Полученные в последнее время благодаря накоплению высокоточных данных ГНСС-наблюдений параметры деформации земной поверхности показали, что эллипсы искривления, характеризующиеся максимальными и минимальными величинами сжатия и расширения, а также лево-, правосторонними поступательно-вращательными движениями отдельных морфоструктур, находятся в хорошей взаимосвязи с теми или иными аспектами новейших позднеплиоцен-четвертичных движений земной коры. Следует отметить, что выделенные геоблоки находят некоторое отображение и в аномалиях геомагнитного поля и намагни-

ченности земной коры [Орлюк, 2000; Орлюк и др., 2017; Кутас и др., 2018], а именно, блокам I и II соответствуют слабоотрицательные поля и слабая намагниченность земной коры, а блокам III и IV — положительные геомагнитные аномалии и соответственно намагниченная земная кора (рис. 9). Также намечается их взаимосвязь со скоростями продольных сейсмических волн на глубине 50 км [Гейко и др., 1998], а именно, для III и IV блоков, вращающихся против часовой стрелки, характерны пониженные скорости сейсмических волн (7,91—8,01 км/с), а для I и II блоков — повышенные их значения (7,92—8,11 км/с) (см. рис. 9). Принципиально такая картина распределения скоростей сохраняется и в верхней мантии до глубин 200 км [Цветкова и др., 2016].

Интересным представляется тот факт, что как по скоростной характеристике, так и по направлению вращения земной поверхности Украинские Карпаты разделяются на северо-западную и юго-восточную части. Можно еще говорить, что они «не чувствуются» в этих параметрах.

Месторасположение областей преобладающего расширения и сжатия земной поверхности и конфигурация зоны их сочленения, а также направления осей их максимальных и минимальных величин свидетельствуют минимум о трех обуславливающих их факторах. Первым фактором является наличие новейших зон тектонических поднятий (ВПВ, Приазовская возвышенность и Донецкий кряж) и опусканий (Полесская и Приднепровская низменности). В первом приближении области поднятий, соответствующие максимальным амплитудам плиоцен-четвертичных движений и отличающиеся положительными аномалиями геоида, характеризуются преобладающим расширением земной поверхности. На этот тип движений накладываются современные напряжения (и, соответственно, перемещения), связанные с тектоническим движением Евразийской плиты в северо-восточном направлении, а также напряжения широтного направления, обусловленные неравномерным вращением

Земли. Последние два фактора являются глобально-региональными относительно первого. По-видимому, взаимодействием этих трех составляющих можно объяснить амплитуды и направление перемещений земной поверхности, направление осей расширения—сжатия как в пределах самих структур, так и в области их сочленения. Эти три современные силы удовлетворительно объясняют и лево-, правосторонние вращения выделенных четырех геоблоков: Северо-Западного (I) и Северо-Восточного (II), вращающихся по часовой стрелке, и Юго-Западного (III) и Юго-Восточного (IV) — против часовой стрелки. Такое их вращение хорошо объясняется с позиций вихревой гидродинамики [Викулин, 2010; Гунин, 2018], в соответствии с уравнениями которой вертикальный градиент плотности в гравитационном поле Земли приводит к вращению вещества среды в горизонтальной плоскости. Причем при подъеме вещества земной коры формируется его линза с вращением против часовой стрелки, а при погружении — по часовой стрелке. Все это подтверждается в нашем случае плотностной неоднородностью земной коры, проявляющейся в большей или меньшей степени аномалиями гравитационного поля и геоида, а также амплитудами ПЧВД земной коры. Естественно, что выделенные на территории Украины геоблоки являются, по-видимому, частями более крупных структур, вращающихся в настоящее время против и по часовой стрелке. В частности, юго-западный (III) и юго-восточный (IV) блоки, вращающиеся против часовой стрелки, являются составной частью крупной мегаструктуры с однотипным вращением, охватывающей территорию запада Черноморского бассейна, юго-западной части Западно-Европейской платформы и Адриатического моря [Сучасна..., 2015]. Интересным представляется тот факт, что в современных деформационных и поступательно-вращательных движениях земной поверхности слабо проявляется древняя блокировка фундамента докембрийского и палеозойского возрастов, хотя современные линейные

по которым они происходят, часто унаследуют древние разломы и разломные зоны.

Авторы отдают себе отчет в том, что движения зафиксированы на очень коротком временном интервале и потому трудно выполнить их экстраполяцию в геологическое «прошлое и будущее». Однако корреляция современных движений с особенностями геологических структур земной коры на новейшем этапе развития позволяет говорить об их реальности и унаследованности, соответственно позволяющими анализировать современные мантийно-коровые процессы. В этом аспекте очень интересным представляется сам факт обнаружения сил, приводящих к образованию кольцевых структур, имеющих вихревую природу их образования. В настоящее время обнаружено много разноранговых и разномасштабных кольцевых структур⁶ [Викулин, 2008; Ворошилов, 2012; Гунин, 2018]. Эти структуры могут иметь разный генезис: эндогенные (тектонические, магматические, метаморфические), космогенные (импактные), экзогенные (карстовые воронки, нуклеарные), гипотетические (воронки водородной дегазации) [Слензак, 1972; Викулин, 2010; Шестопалов и др., 2018]. Естественно, что выделенные четыре геоблока на территории Украины отображают масштаб исследования, не позволяющий обнаружить крупномасштабную блокировку и возможность выделения мелких кольцевых структур. Но сам факт их обнаружения представляет несомненный интерес в связи с возможностью выявления принципиально новых в геодинамическом отношении современных кольцевых структур, с которыми могут быть связаны месторождения разнообразных полезных ископаемых включительно с углеводородами и водородом как продуктов современных мантийно-коровых процессов.

Весьма интересным представляется выяснение пространственных характеристик выявленных структур. Если в отношении горизонтальных размеров геоблоков и

⁶ miloserdovalv.narod.ru/zagruzki/airo/9-kolcevye_strukturny.pdf

зон возможного их движения и вращения все более-менее ясно (они используют современные линеаментные зоны с ослабленными прочностными свойствами пород — разломы), то глубина их заложения и внутренняя структура остается под вопросом. В качестве первоначального приближения можно предположить, что глубина заложения может быть связана с наличием резких плотностных границ [Старостенко и др., 2012]: осадочного чехла и кристаллического фундамента; Конрада, разделяющую гранитогнейсовую и диоритово-базальтовую кору; Мохоровичича — между земной корой и верхней мантией и, наконец, между литосферой и астеносферой, располагающейся в пределах Украины на глубинах от 50 до 220 км [Кутас и др., 2018]. Также следует отметить, что кольцевые структуры, имеющие в своем генезисе вихревую природу, могут оказаться существенным дополнительным фактором исследования и понимания геодинамических современных и исторических процессов в литосфере наравне с плитовой тектоникой, доминирующей в настоящее время [Старостенко, Гинтов, 2018]. Одной из проблем новой глобальной тектоники является отсутствие свободного пространства для больших горизонтальных и тем более вертикальных перемещений коромантийных блоков. В случае вихревых структур эта проблема снимается, поскольку вращение блоков не требует свободного пространства, а в зависимости от размеров самой структуры могут образовываться и активизироваться прямолинейные участки разломов разной длины с учетом касательных напряжений, возникающих в краевых частях вращающегося блока.

Выводы. В Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины на основе высокоточных координат и векторов смещения сети перманентных ГНСС-станций для всей территории Украины были получены параметры деформации земной поверхности, представленные эллипсами искривления (сжатия—растяжения) и вращения (по и против часовой стрелки). На

основе анализа параметров деформации поверхности Земли с высотами квазигеоида УГК2012 и новейшими позднеплиоцен-четвертичными движениями и линеаментными зонами и разломами можно сделать следующие выводы.

1. Выделены области преобладающих величин сжатия—расширения и лево-, правостороннего вращения земной поверхности, границы между которыми могут быть проведены по линеаментным зонам и разломам плиоцен-четвертичного этапа развития. При этом установлены «синусоидальные» конфигурации зон сочленения разных типов деформации земной поверхности, которые находятся в противофазе друг к другу.

2. В первом приближении областям преобладающего расширения земной поверхности соответствуют зоны новейших тектонических поднятий (ВПВ, Приазовская возвышенность), максимальные амплитуды плиоцен-четвертичных движений и положительные аномалии геоида, а преобладающего сжатия — тектонических опусканий (Полесская и Приднепровская низменности) и минимальных амплитуд плиоцен-четвертичных движений земной коры.

3. В пределах территории Украины могут быть выделены четыре крупные современные морфоструктуры (геоблока): Северо-Западный (I) и Северо-Восточный (II), вращающиеся по часовой стрелке, и Юго-Западный (III) и Юго-Восточный (IV), вращающиеся против часовой стрелки, которые вычленяются линеаментными зонами северо-восточного и северо-западного простирания.

4. На качественном уровне предложен механизм взаимосвязи современных и новейших движений земной коры, а именно: наличие новейших зон тектонических поднятий и опусканий с соответствующими напряжениями и перемещениями, на которые накладываются современные напряжения (и соответственно перемещения), связанные с тектоническим движением Евразийской плиты в северо-восточном направлении и неравномерным вращением Земли.

Список литературы

- Буш В. А. Трансконтинентальные линеаменты и проблемы мобилизма. *Геотектоника*. 1983. № 4. С. 14—25.
- Верховцев В. Г. Новітні платформні геоструктури України та динаміка їх розвитку: Дис. ...д-ра геол. наук. Київ, Ін-т геологічних наук НАН України, 2008. 423 с.
- Викулин А. В. Мир вихревых движений. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008. 230 с.
- Викулин А. В. Новый тип упругих ротационных волн в геосреде и вихревая геодинамика. *Геодинамика и тектонофизика*. 2010. Т. 1. № 2. С. 119—141.
- Ворошилов В. Г. Вихровая природа рудогенных геохимических полей. *Известия Томского политехнического университета*. 2012. Т. 321. № 1. С. 48—51.
- Гейко В. С., Цветкова Т. А., Санникова Н. Г., Ливанова Л. П., Гейко К. В. Региональная 3-D P-скоростная структура мантии северо-западной Евразии. *Геофиз. журн.* 1998. Т. 2. № 3. С. 67—91.
- Гунин В. И. Вихревая гидродинамика: новый подход к моделированию геосистем. *Вестник пермского университета. Математика. Механика. Информатика*. 2018. Вып. 1(40). С. 5—18.
- Ентин В. А., Гуськов С. И., Орлюк М. И., Гинтов О. Б., Осьмак Р. В. Карта абсолютных значений поля силы тяжести Украины и некоторые аспекты ее возможной интерпретации. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 1. С. 53—61. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i1.2015.111323>.
- Ищенко М. В. Оцінка швидкостей за даними ГНСС-спостережень в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України для подальших геодинамічних досліджень. *Вісник Астрономічної школи*. 2017. Т. 13. № 1. С. 48—53.
- Ищенко М. В., Орлюк М. И. Деформація поверхні Землі за даними ГНСС-мережі у зв'язку з квазігеоїдом УКГ2012 та новітніми рухами: Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: Доп. шостої Всеукр. конф. «ГЕО-УА 2018» (Київ, Україна, 18—19 вересня 2018 р.). Київ: EOS, 2018. С. 101—104.
- Кутас Р. И., Орлюк М. И., Пашкевич И. К., Бурахович Т. К., Макаренко И. Б., Бугаенко И. В. Глубинное строение территории Украины по современным геофизическим данным. Общие сведения. В кн.: *Очерки геодинамики Украины*. Под ред. В. И. Старостенко, О. Б. Гинтова. Киев: ВІ ЕН ЕЙ, 2018. С. 17—24.
- Ломакин И. Э., Покалюк В. В., Кочелаб В. В., Шураев И. Н. Азово-Адриатический мегалинеament — трансрегиональная зона сопряженных глубинных разломов юга Европы. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2018. № 2. С. 30—48.
- Марченко О. М., Кучер О., Марченко Д. Результати уточнення квазігеоїда УКГ2012 для території України. *Вісник геодезії та картографії*. 2013. № 3(84). С. 3—10.
- Марченко О. М., Третьяк К. Р., Серант О. В., Висотенко Р. О. Оцінювання тензора швидкостей деформації земної кори за даними GPS-спостережень у Східній Європі. *Геодинаміка*. 2011. № 1. С. 5—16.
- Орлюк М. И. Пространственные и пространственно-временные магнитные модели разноранговых структур литосферы континентального типа. *Геофиз. журн.* 2000. Т. 22. № 6. С. 148—165.
- Орлюк М. И., Роменец А. А., Марченко А. В., Орлюк И. М., Иващенко И. Н. Магнитное склонение на территории Украины: результаты наблюдений и вычислений. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 2. С. 73—85. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i2.2015.111307>.
- Орлюк М. И., Марченко А. В., Роменец А. А. Пространственно-временные изменения геомагнитного поля и сейсмичность. *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 6. С. 84—105. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i6.2017.116371>.
- Сучасна геодинаміка та геофізичні поля Карпат і суміжних територій. Ред. К. Р. Третьяк, В. Ю. Максимчук, Р. І. Кутас. Львів: Львівська політехніка, 2015. 420 с.

- Слензак О. И. Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. Киев: Наук. думка, 1972. 182 с.
- Старостенко В. И., Куприенко П. Я., Макаренко И. Б., Легостаева О. В., Савченко А. С. Плотностная неоднородность земной коры вдоль широтных зон разломов Украинского щита и Днепровско-Донецкой впадины. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 6. С. 113—132. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i6.2012.116718>.
- Старостенко В. И., Гинтов О. Б. Проблемы геодинамики Украинского докембрия (обзор взглядов). В кн.: *Очерки геодинамики Украины*. Под ред. В. И. Старостенко, О. Б. Гинтова. Киев: ВІ ЕН ЕЙ, 2018. С. 355—367.
- Тимофеев В. Ю., Ардюков В. Г., Тимофеев А. В., Бойко Е. В. Современные движения земной поверхности Горного Алтая по GPS-наблюдениям. *Геодинамика и тектонофизика*. 2019. Т. 10. № 1. С. 123—146.
- Хо́да О. О. Оцінка координат східноєвропейських перманентних ГНСС-станцій в системі координат IGB08 для GPS-тижнів 1709—1933. *Кинематика и физика небесных тел*. 2019. Т. 35. № 1 С. 70—80.
- Цветкова Т. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Скоростная делимость мантии под Украинским щитом. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 4. С. 75—87. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107802>.
- Шестопалов В. М., Лукин А. Е., Згонник В. А., Макаренко А. Н., Ларин Н. В., Богуславский А. С. *Очерки дегазации Земли*. Киев: Изд. Ин-та геол. наук НАН Украины, 2018. 632 с.
- Araszkiewicz, A., Figurski, M., & Jarosiński, M. (2016). Erroneous GNSS Strain Rate Patterns and their Application to Investigate the Tectonic Credibility of GNSS Velocities. *Acta Geophysica*, 64(5), 1412—1429. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0057>.
- Argus, D., Gordon, R., & DeMets, C. (2011). Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(11), 1—13. <https://doi.org/10.1029/2011GC003751>.
- Bogdanova, S., Gorbatshev, R. & Geretsky, R. G. (2016). EUROPE|East European Craton. In Reference Module in Earth and Environmental Sciences (pp. 1—18). doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10020-X.
- Caporali, A. (2013). Towards a Dense Velocity Field for Central Europe. EGU General Assembly 2013, held 7—12 April, 2013 in Vienna, Austria.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. (2015). Bernese GNSS Software Version 5.2, Astronomical Institute, University of Berne.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal timescale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, 21, 2191—2194. <https://doi.org/10.1029/94GL02118>.
- Devoti, R., Pietrantonio, G., & Riguzzi, F. (2014). GNSS networks for geodynamics in Italy. *Fisica de la Tierra*, 26, 11—24. http://dx.doi.org/10.5209/rev_FITE.2014.v26.46968.
- Hackl, M., Malservisi, R., & Wdowinski, S. (2009). Strain rate patterns from dense GPS networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1177—1187. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1177-2009>.
- Hill, E., & Blewitt, G. (2006). Testing for fault activity at Yucca Mountain, Nevada, using independent GPS results from the BARGEN network. *Geophysical Research Letters*, 33, L14302. <https://doi.org/10.1029/2006GL026140>
- Ishchenko, M. (2018). Investigation of deformation of the earth crust on the territory of Ukraine using a GNSS observation. *Artificial Satellite*, 53(3), 117—126. <https://doi.org/10.2478/arsa-2018-0009>.
- Goudarzi, M., Cocard, M., & Santerre, R. (2015). GeoStrain: An open source for calculating crustal strain rates. *Computers and Geosciences*, 82, 1—12. doi: 10.1016/j.cageo.2015.05.007.
- Khoda, O. (2017). EPN Densification Project: Report of the Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine. Presented at the EUREF Analysis Centres Workshop. Brussels (Belgium).
- Love, A. (1944). *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*. New York: Dover Publications.
- Orlyuk, M., Marchenko, A., Romenets, A., & Bakarjieva, M. (2018). Ukrainian Regional Mag-

- netic Map: the results of calculations of the geomagnetic field components for the Epoch 2015. *COBS Journal*, (5), 40.
- Peter, Y. (2000). *Present-day crustal dynamics in the Adriatic-Aegean plate boundary zone inferred from continuous GPS-measurements*. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- Savage, J., Gan, W., & Svarc, J. (2001). Strain accumulation and rotation in the Eastern California Shear Zone. *Journal of Geophysical Research*, 106(B10), 21995—22007. <https://doi.org/10.1029/2000JB000127>.
- Stangl, G., Caporali, A., Mitterschiffthaler, P., & Zurutuza, J. (2014). Velocity Field of Central Europe from CEGRN Campaigns and CERGOP Permanent Stations: *EGU General Assembly 2014, held 27 April — 2 May, 2014 in Vienna, Austria*.
- Uzel, T., Eren, K., & Gulal, E. (2013). Monitoring the tectonic plate movements in Turkey based on the national continuous GNSS network. *Ara-bian Journal of Geosciences*, 6(9), 3573—3580. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0631-5>.
- Wald, R. (1984). *General Relativity*. University of Chicago press, Chicago, IL.
- Wu, Y., Jiang, Z., Yang, G., Wei, W., & Liu, X. (2011). Comparison of GPS strain rate computing methods and their reliability. *Geophysical Journal International*, 185(2), 703—717.
- Ze, Z., Guojie, M., Xiaoning, S., Jicang, W., & Xiaojing, L. J. (2012). Global crustal movement and tectonic plate boundary deformation constrained by the ITRF2008. *Geodesy and Geodynamics*, 3(3), 40—45. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1246.2012.00040>.

Comparative analysis of modern deformation and the newest motions of the Earth surface in the territory of Ukraine

M. I. Orlyuk, M. V. Ishchenko, 2019

Currently, the data of the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are widely used in the field of navigation, geodesy, cartography and regional geodynamic studies, in particular, in monitoring the movement of lithospheric plates, etc. Further development and creation of local GNSS networks, as well as the long-term replenishment of databases regarding the determination of the coordinates of individual stations and the speeds of their movement allows obtaining reliable more detailed information on the current deformation of the Earth's surface. The article discusses the current deformation of the Earth's surface based on the analysis of the Global Navigation Satellite Systems data from the GAO NAS of Ukraine in comparison with the heights of the UGK2012 quasi-geoid and the latest lineament zones and faults, as well as with the late Pliocene-Quaternary vertical movements of the Earth's crust. According to the results of the analysis of high-precision coordinates of displacement vectors of permanent GNSS stations in the territory of Ukraine, deformation parameters of the Earth's surface were obtained, areas of prevailing compression values — tension and left-right-side rotation of the Earth's surface were identified, the boundaries between which can be drawn along the latest lineament zones and faults. The areas of the predominant stretching of the Earth's surface correspond to the zones of the newest tectonic uplifts (Volyn-Podolsk and Periazov hills) and maximum amplitudes of the Pliocene-Quaternary movements and positive geoid anomalies, and the areas of prevailing compression are zones of tectonic descents (Polissian and Peridnieper lowland), minimal amplitudes of Pliocene-Quaternary movements and minor heights of the geoid. Four large modern geoblocks have been identified: North-West and North-East, which rotate clockwise, and South-West and South-East rotating counterclockwise. At a qualitative level, the mechanism of interconnection of modern and newest movements of the Earth's crust, namely, the presence of the latest tectonic zones of uplifting and lowering

with corresponding tensions and movements of its surface, on which modern tensions (and corresponding movements) are imposed that are associated with the tectonic movement of the Eurasian Plate in northeastern direction and the irregular rotation of the Earth.

Key words: GNSS data, modern and new movements of the Earth's crust, lineaments, faults, geoblocks, Ukraine.

References

- Bush, V. A. (1983). Transcontinental lineaments and mobilism problems. *Geotectonika*, (4), 14—25 (in Russian).
- Verkhovtsev, V. G. (2008). New platform geostuctures of Ukraine and the dynamics of their development: *Doctor's thesis*. Kiev, Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 423 p. (in Ukrainian).
- Vikulin, A. V. (2008). *The World of Vortex Motions*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Publ. of Kamchatka State Technical University, 230 p. (in Russian).
- Vikulin, A. V. (2010). New type of elastic rotational waves in the geomeidia and vortex geodynamics. *Geodinamika i tektonofizika*, 1(2), 119—141 (in Russian).
- Voroshilov, V. G. (2012). Vortex nature of ore genic geochemical fields. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 321(1), 48—51 (in Russian).
- Geyko, V. S., Tsvetkova, T. A., Sannikova, N. G., Livanova, L. P., & Geyko, K. V. (1998). Regional 3-D P-speed structure of the mantle of northwestern Eurasia. *Geofizicheskiy zhurnal*, 2(3), 67—91 (in Russian).
- Gunin, V. I. (2018). Vortex hydrodynamics: a new approach to modeling geosystems. *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Informatika*, (1), 5—18 (in Russian).
- Entin, V. A., Guskov, S. I., Orlyuk, M. I., Gintov, O. B., & Osmak, R. V. (2015). A map of absolute values for gravity field of Ukraine and some aspects of its possible interpretation. *Geofizicheskiy zhurnal*, 37(1), 53—61. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i1.2015.111323> (in Russian).
- Ishchenko, M. V. (2017). Estimation of velocities according to GNSS observations in the GNSS Analysis Center of the GAO NAS of Ukraine for further geodynamic studies. *Visnyk Astronomichnoyi shkoly*, 13(1), 48—53 (in Ukrainian).
- Ischenko, M. V., & Orlyuk, M. I. (2018). Deformation of the Earth's surface according to the GNSS network in connection with the UKGS 2012 quasi-geoid and the newest movements: *Aerospace Observations for Sustainable Development and Security: Reports of the sixth All-Ukrainian Conference «GEO-UA 2018» (Kiev, Ukraine, September 18—19, 2018)* (pp. 101—104). Kiev: EOS (in Ukrainian).
- Kutas, R. I., Orlyuk, M. I., Pashkevich, I. K., Burakhovich, T. K., Makarenko, I. B., & Bugayenko, I. V. (2018). Depth structure of the territory of Ukraine according to modern geophysical data. General information. In V. I. Starostenko, O. B. Gintov (Eds.), *Essays on Geodynamics of Ukraine* (pp. 17—24). Kiev: VI EN EY (in Russian).
- Lomakin, I. E., Pokalyuk, V. V., Kochelab, V. V., & Shuraev, I. N. (2018). The Azov-Adriatic Megalineament is a transregional zone of conjugate deep faults in southern Europe. *Geologiya i poleznyye iskopayemyye Mirovogo okeana*, (2), 30—48 (in Russian).
- Marchenko, A. M., Kucher, A., & Marchenko, D. (2013). The results of the refinement of the quasideoid UKG 2012 for the territory of Ukraine. *Visnyk heodeziyi ta kartohrafiyi*, (3), 3—10 (in Ukrainian).
- Marchenko, A. M., Tretyak, K. R., Serant, O. V., Vivotenko, R. A. (2011). Estimation of the crustal deformation rate tensor from GPS observations in Eastern Europe. *Geodynamika*, (1), 5—16 (in Ukrainian).
- Orlyuk, M. I. (2000). Spatial and space-time magnetic models of different-rank structures of the continental-type lithosphere. *Geofizicheskiy zhurnal*, 22(6), 148—165 (in Russian).
- Orlyuk, M. I., Romenets, A. A., Marchenko, A. V., Orliuk, I. M., & Ivashchenko, I. N. (2015). Magnetic declination of the territory of Ukraine: results of observations and calculations. *Geofizicheskiy zhurnal*, 37(2), 73—85. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i2.2015.111307> (in Russian).

- Orlyuk, M. I., Marchenko, A. V., & Romenets, A. A. (2017). Spatial-temporal changes in the geomagnetic field and seismicity. *Geofizicheskiy zhurnal*, 39(6), 84—105. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i6.2017.116371> (in Russian).
- Tretyak, K. R., Maksimchuk, V. Yu., & Kutas, R. I. (Eds.). *Modern geodynamics and geophysical fields of the Carpathians and adjacent territories*. Lviv: Lvivska politekhnik, 420 p. (in Ukrainian).
- Slenzak, O. I. (1972). Vortex systems of the lithosphere and Precambrian structures. Kiev: Naukova Dumka, 182 p. (in Russian).
- Starostenko, V. I., Kuprienko, P. Ya., Makarenko, I. B., Legostaeva, O. V., & Savchenko, A. S. (2012). Density inhomogeneity of the earth's crust along the latitudinal zones of the faults of the Ukrainian shield and the Dnieper-Donets basin. *Geofizicheskiy zhurnal*, 34(6), 113—132. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i6.2012.116718> (in Russian).
- Starostenko, V. I., & Gintov, O. B. (2018). Problems of geodynamics of the Ukrainian Precambrian (a review of views). In: Starostenko V. I., Gintov O. B. (Eds.), *Essays on Geodynamics of Ukraine* (pp. 355—367). Kiev: VI EN EY (in Russian).
- Timofeev, V. Yu., Ardyukov, V. G., Timofeev, A. V., & Boyko, E. V. (2019). Modern movements of the Earth's surface in Gorny Altai from GPS observations. *Geodinamika i tectonofizika*, 10(1), 123—146 (in Russian).
- Khoda, O. (2019). Coordinate estimation of East European permanent GNSS stations in the IGB08 coordinate system for GPS weeks 1709—1933. *Kinematika i fizika nebesnykh tel*, 35(1), 70—80 (in Ukrainian).
- Tsvetkova, T. A., Bugaenko, I. V., & Zaets, L. N. (2016). Velocity divisibility of the mantle beneath the Ukrainian shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 38(4), 75—87. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107802> (in Russian).
- Shestopalov, V. M., Lukin, A. E., Zgonnik, V. A., Makarenko, A. N., Larin, N. V., & Boguslavsky, A. S. (2018). *Essays on the degassing of the Earth*. Kiev: Publ. Institute of Geological Sciences, National Academy of Sciences of Ukraine, 632 p. (in Russian).
- Araszkiewicz, A., Figurski, M., & Jarosiński, M. (2016). Erroneous GNSS Strain Rate Patterns and their Application to Investigate the Tectonic Credibility of GNSS Velocities. *Acta Geophysica*, 64(5), 1412—1429. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0057>.
- Argus, D., Gordon, R., & DeMets, C. (2011). Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(11), 1—13. <https://doi.org/10.1029/2011GC003751>.
- Bogdanova, S., Gorbatshev, R. & Geretsky, R. G. (2016). EUROPE | East European Craton. In Reference Module in Earth and Environmental Sciences (pp. 1—18). doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10020-X.
- Caporali, A. (2013). Towards a Dense Velocity Field for Central Europe. EGU General Assembly 2013, held 7—12 April, 2013 in Vienna, Austria.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. (2015). Bernese GNSS Software Version 5.2, Astronomical Institute, University of Berne.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal timescale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, 21, 2191—2194. <https://doi.org/10.1029/94GL02118>.
- Devoti, R., Pietrantonio, G., & Riguzzi, F. (2014). GNSS networks for geodynamics in Italy. *Fisica de la Tierra*, 26, 11—24. http://dx.doi.org/10.5209/rev_FITE.2014.v26.46968.
- Hackl, M., Malservisi, R., & Wdowinski, S. (2009). Strain rate patterns from dense GPS networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1177—1187. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1177-2009>.
- Hill, E., & Blewitt, G. (2006). Testing for fault activity at Yucca Mountain, Nevada, using independent GPS results from the BARGEN network. *Geophysical Research Letters*, 33, L14302. <https://doi.org/10.1029/2006GL026140>
- Ishchenko, M. (2018). Investigation of deformation of the earth crust on the territory of Ukraine using a GNSS observation. *Artificial Satellite*, 53(3), 117—126. <https://doi.org/10.2478/arsa-2018-0009>.

- Goudarzi, M., Cocard, M., & Santerre, R. (2015). GeoStrain: An open source for calculating crustal strain rates. *Computers and Geosciences*, 82, 1—12. doi: 10.1016/j.cageo.2015.05.007.
- Khoda, O. (2017). EPN Densification Project: *Report of the Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine*. Presented at the EUREF Analysis Centres Workshop. Brussels (Belgium).
- Love, A. (1944). *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*. New York: Dover Publications.
- Orlyuk, M., Marchenko, A., Romenets, A., & Bakarjieva, M. (2018). Ukrainian Regional Magnetic Map: the results of calculations of the geomagnetic field components for the Epoch 2015. *COBS Journal*, (5), 40.
- Peter, Y. (2000). *Present-day crustal dynamics in the Adriatic-Aegean plate boundary zone inferred from continuous GPS-measurements*. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- Savage, J., Gan, W., & Svarc, J. (2001). Strain accumulation and rotation in the Eastern California Shear Zone. *Journal of Geophysical Research*, 106(B10), 21995—22007. <https://doi.org/10.1029/2000JB000127>.
- Stangl, G., Caporali, A., Mitterschiffthaler, P., & Zurutuza, J. (2014). Velocity Field of Central Europe from CEGRN Campaigns and CERGOP Permanent Stations: *EGU General Assembly 2014, held 27 April — 2 May, 2014 in Vienna, Austria*.
- Uzel, T., Eren, K., & Gulal, E. (2013). Monitoring the tectonic plate movements in Turkey based on the national continuous GNSS network. *Ara-bian Journal of Geosciences*, 6(9), 3573—3580. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0631-5>.
- Wald, R. (1984). *General Relativity*. University of Chicago press, Chicago, IL.
- Wu, Y., Jiang, Z., Yang, G., Wei, W., & Liu, X. (2011). Comparison of GPS strain rate computing methods and their reliability. *Geophysical Journal International*, 185(2), 703—717.
- Ze, Z., Guojie, M., Xiaoning, S., Jicang, W., & Xiaojing, L. J. (2012). Global crustal movement and tectonic plate boundary deformation constrained by the ITRF2008. *Geodesy and Geodynamics*, 3(3), 40—45. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1246.2012.00040>.