

К.Р. Третьак, А.Я. Кульчицький, Ю.І. Голубінка  
Національний університет "Львівська політехніка"

## ГЕОЛОГІЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ СУЧАСНОЇ ДИНАМІКИ АНТАРКТИЧНОЇ ТЕКТОНІЧНОЇ ПЛИТИ

© Третьак К.Р., Кульчицький А.Я., Голубінка Ю.І., 2006

*Подано методику визначення лінійних зміщень перманентних GPS-станцій, обумовлених тектонічними деформаціями. Застосовуючи цю методику, опрацьовано результати спостережень шести перманентних GPS-станцій, розташованих на території Антарктичної тектонічної плити, побудовано карт-схему векторів зміщень перманентних станцій, виконано геологічну інтерпретацію результатів досліджень.*

*In article produced computational procedure of linear displacement of permanent GPS stations caused by tectonic deformations. Using this procedure computed observation results of six permanent GPS stations, situated on Antarctic tectonic plate, the map of vector displacement of permanent stations is constructed, executed geological interpretation of investigation results.*

**Постановка проблеми.** Інтенсивний розвиток протягом останнього двадцятиріччя методів космічної геодезії (VLBI, SLR, DORIS, GPS) дав змогу достовірно та з високою точністю досліджувати сучасну кінематику тектонічних плит. На відміну від даних геолого-геофізичних досліджень, результатом яких є значення швидкостей руху тектонічних плит, визначених за значні періоди часу (мільйони років), методи космічної геодезії дають змогу вивчати рухи тектонічних плит фактично в реальному часі. Найбільшого використання у вивченні сучасної неотектоніки набув метод GPS. В наш час існує загальноземна мережа перманентних (постійнодіючих) GPS-станцій, в результаті спостережень яких визначаються їх зсуви по координатних осях, які характеризують напрямок та швидкість руху плити.

Перед новою глобальною тектонікою плит стоїть багато запитань, на які вона не завжди спроможна відповісти. Пояснення сучасної динаміки літосферних плит, з точки зору відцентрово-інерційного механізму (ВІМ), може дати відповідь на багато питань, зокрема на такі:

- джерело походження глибинної енергії;
- напрямок руху конвекційних потоків;
- утворення мантійних плюмів, які беруть участь у процесі спредингу;
- періодичність екзогенних та ендегенних процесів, які, з точки зору глобальної тектоніки, не мають пояснення.

Щодо Антарктичної тектонічної плити такий підхід дасть можливість по-новому пояснити природу напрямків руху, розташованих там перманентних GPS-станцій.

**Зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями.** Дослідження динаміки Антарктичної тектонічної плити за результатами аналізу зміщень перманентних GPS-станцій уможливить істотно доповнити наявну інформацію про геолого-тектонічну структуру Антарктики.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Наукові дослідження геолого-тектонічної структури Антарктичної тектонічної плити були розпочаті зі створенням перших Антарктичних станцій. Результати досліджень, які стосуються кінематики Антарктичної плити з використанням GPS-спостережень, наведені в [5]. Крім того, під керівництвом SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research) створено групу дослідників, яка займається дослідженнями неотектоніки в Антарктиді ANTEC (ANTARCTIC NEOTECTONICS) [6]. Основні напрямки досліджень ANTEC:

- кінематика Антарктичної плити;

- структура літосфери Антарктики;
- дослідження регіональних деформацій;
- геоморфологічні дослідження;
- дослідження вулканічної активності.

Особливості геологічної будови Антарктиди доволі детально розглянуті у роботі [2]. Що стосується інтерпретації сучасної кінематики тектонічних плит, то необхідно згадати про відцентрово-інерційний механізм природи руху літосферних плит, описаний у [4]. Автори спираються на дані досліджень руху частинок гірських порід у так званому відцентрово планетарному млині, який вважають, з точки зору механіки, ідентичним до руху Землі у Сонячній системі. Такий підхід, на нашу думку, є дуже привабливим у багатьох відношеннях, хоча визначальна роль ВІМ дещо перебільшена.

**Невирішені частини загальної проблеми.** Огляд літератури свідчить про те, що під час визначення векторів руху тектонічної плити на основі результатів спостережень перманентних GPS-станцій не диференціюється рух плити, викликаний її внутрішніми деформаціями та зумовлений впливом зовнішніх чинників. Метою геологічних досліджень є геологічна інтерпретація векторів руху Антарктичної плити.

**Виклад матеріалу.** В [1] нами була розроблена і подана методика визначення складових вектора зміщення з опрацювання просторових кінематичних GPS-мереж, яка дає змогу отримати зміщення станції, викликане внутрішніми деформаціями тектонічної плити, та вектор зміщення, викликаний впливом зовнішніх чинників. На основі експериментальних досліджень встановлено, що сучасні зміщення тектонічних плит протягом 10 років мають лінійний характер. **Мета цієї роботи** – розробити теоретичні засади та методику розрахунку лінійних зміщень перманентних станцій, зумовлених тектонічними деформаціями, та виконати інтерпретацію динаміки Антарктичної плити на основі отриманих нами результатів.

За результатами класичного урівноваження зміну координати  $X$  двох перманентних станцій ( $r$  і  $u$ ) можна подати лінійними рівняннями вигляду

$$X_r = a_r t + b_r, X_u = a_u t + b_u, \quad (1)$$

де  $a_r$  – середнє зміщення перманентної станції  $r$ , визначене за результатами класичного урівноваження;  $t$  – різниця часу між початковою та кінцевою епохами спостережень;  $b_r$  – координата  $X$  станції  $r$  на початкову епоху спостережень.

Інтегральний вираз середніх квадратичних відхилень проєкцій вимірних векторів між станціями  $r$  та  $u$  на відповідну координатну вісь виглядає так:

$$\nabla_{X_{r,u}}^k = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^k \left( \Delta x_{r,u}^l - \frac{\sum_{l=1}^k \Delta x_{r,u}^l}{k} \right)^2}{k}} = \frac{\left[ \int_{t_p}^{t_k} [(a_u - a_r)t + (b_u - b_r)] dt \right]^2}{t_k - t_p}, \quad (2)$$

де  $k, l$  – порядковий номер останнього та поточного циклів спостережень;  $\Delta x_{r,u}^l$  – проєкція вимірних векторів на відповідну координатну вісь;  $t_p, t_k$  – час початку та кінця спостережень.

Виконуючи інтегрування, визначаємо

$$\nabla_{X_{r,u}} = \frac{[(a_u - a_r)(t_k - t_p)]^2}{12}. \quad (3)$$

Ненормований коефіцієнт кінематики станції  $r$  набуває такого вигляду:

$$\mathfrak{K}_{X_r} = \frac{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^n \nabla x_{ru} (t_k - t_p)^2 \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^n (a_r - a_i)^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (a_r - a_i)^2}{12(n-1)}, \quad (4)$$

де  $n$  – кількість пунктів в мережі.

Тоді нормований коефіцієнт, що характеризує кінематику перманентної станції  $r$ , обчислюється так:

$$K_{X_r} = \frac{\mathfrak{K}_{X_r}}{\sum_{i=1}^n \mathfrak{K}_{X_u}} = \frac{\sum_{i=1}^n (a_r - a_i)^2}{2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (a_u - a_j)^2}. \quad (6)$$

Середньовагове зміщення кожної пари пунктів  $r, u$  з врахуванням кінематичних коефіцієнтів:

$$D_{X_{r,u}} = \frac{(K_{X_u} - K_{X_r}) d_{X_{ru}}}{2(K_{X_u} + K_{X_r})} = \frac{\sum_{i=1}^n (a_r - a_i)^2 - \sum_{i=1}^n (a_u - a_i)^2}{\sum_{i=1}^n (a_r - a_i)^2 + \sum_{i=1}^n (a_u - a_i)^2} (a_r - a_u), \quad (7)$$

де  $d_{X_{ru}}$  – зміна на відповідну координатну вісь довжини проекції вимірної лінії між сусідніми циклами спостережень.

Середньовагове зміщення пунктів  $r, u$ , викликане внутрішніми деформаціями тектонічної плити:

$$dd_x = \frac{2 \sum_{r=1}^{n-1} \sum_{u=r+1}^n D_{X_{r,u}}}{n(n-1)} = \frac{2 \sum_{r=1}^{n-1} \sum_{u=r+1}^n \frac{\sum_{i=1}^n (a_r - a_i)^2 - \sum_{i=1}^n (a_u - a_i)^2}{\sum_{i=1}^n (a_r - a_i)^2 + \sum_{i=1}^n (a_u - a_i)^2} (a_r - a_u)}{n(n-1)}. \quad (8)$$

Середнє зміщення мережі за результатами класичного урівноваження:

$$\Delta \Delta_X = \frac{\sum_{i=1}^n a_i t}{n}, \quad (9)$$

де  $\Delta X_i^{yp}$  – зміщення пунктів пот відповідній осі  $X$  за результатами класичного урівноваження.

Різниці між середнім зміщенням мережі, викликаним деформаціями і отриманим за результатами класичного урівноваження:

$$d\Delta_X = \Delta \Delta_X - dd_X = \frac{\sum_{i=1}^n a_i t}{n} - dd_X. \quad (10)$$

Зміщення перманентної станції, викликане внутрішніми деформаціями тектонічної плити:

$$d_{X_i} = \Delta_{X_i}^{yp} - d\Delta_X = a_i t_k - \left( \frac{\sum_{i=1}^n a_i t_k}{n} - dd_X \right). \quad (11)$$

Для координат  $Y$  і  $Z$  формули (1) – (11) набувають аналогічного вигляду із зміною відповідних коефіцієнтів.

Використовуючи подану вище методику, нами були опрацьовані результати роботи шести перманентних GPS-станцій (CAS1, DAV1, VESL, MCM4, KERG, SYOG), за період від 2003,00 до 2005,15, розташованих на території Антарктичної тектонічної плити. У підсумку ми отримали значення загальних зміщень та зміщень, викликаних внутрішніми деформаціями Антарктичної плити. Зміщення, зумовлені впливом зовнішніх чинників, були визначені, використовуючи правило паралелограма. За цими даними побудовано карт-схему векторів вищезгаданих зміщень (рис. 1).

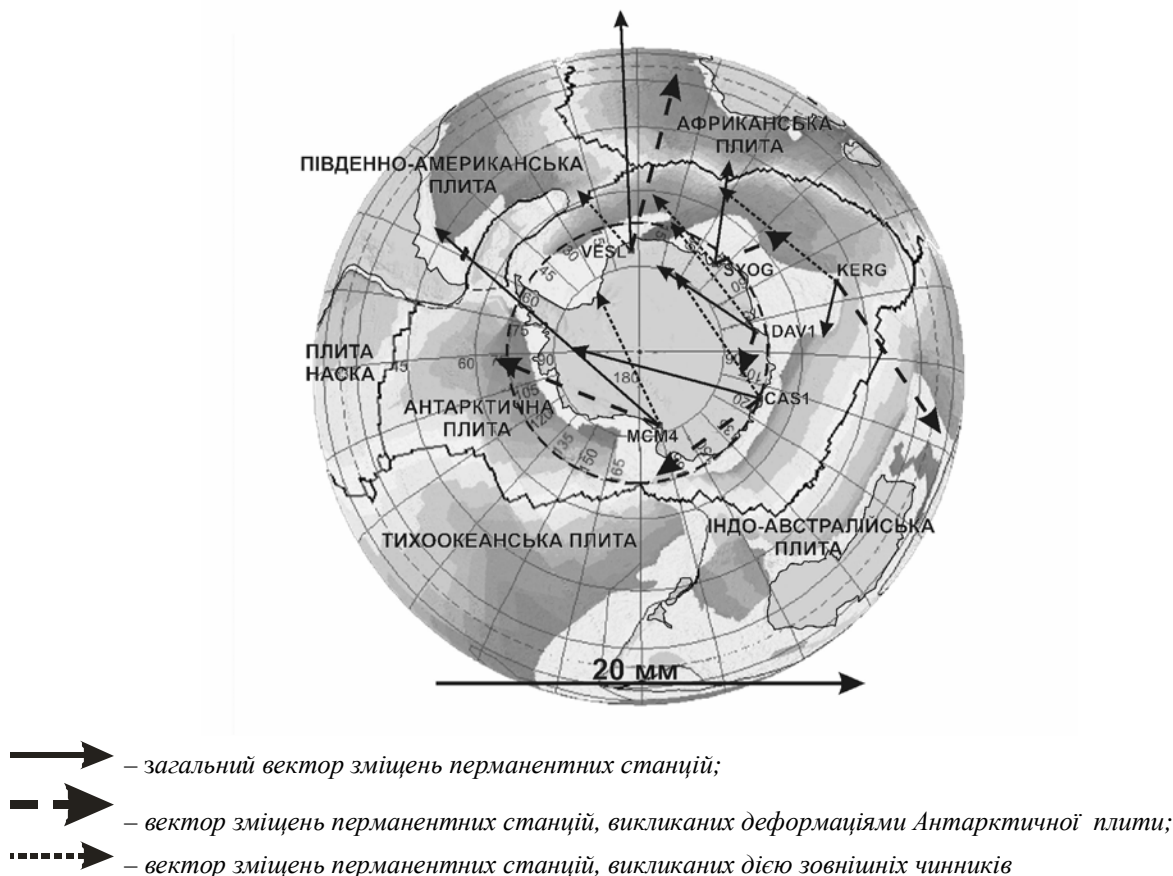


Рис. 1. Карт-схема векторів зміщень перманентних GPS-станцій Антарктичної тектонічної плити

Перш ніж перейти до геологічної інтерпретації векторів зміщень перманентних станцій, дамо характеристику двох головних напрямків інерційних сил, які беруть участь у ВІМ.

Один із визначальних чинників – це так звані планетарно-інерційні сили, спрямовані проти орбітального руху Землі. Ці сили впливають на повітряні маси атмосфери, у гідросфері формують припливну хвилю і екваторіальні течії, у літосфері впливають на рух континентальних плит. Ці сили діють у широтному напрямку.

Другий напрямок у розподілі сил інерції зумовлений сферичною формою планети, обертанням її навколо власної осі та кутом її нахилу до площини орбіти – це є сили Коріоліса і відцентрові сили. Вони спрямовані вздовж меридіанів.

З точки зору ВІМ навколо полюсів дія зсувних сил є мінімальною. Зони мінімального прояву зсувних сил перебувають у межах так званих геодинамічних бар'єрів, місцезнаходження яких

збігається з границями полярних кіл на полюсах Землі [4]. В такий спосіб на Південному полюсі у межах геодинамічного бар'єра знаходиться континент Антарктида, усі інші континенти мають тенденцію руху до Північного полюса. У Північній півкулі ситуація дещо інша – тут навколо північного геодинамічного бар'єра згруповані материки, які утримуються приблизно на однаковій віддалі біля Північного полюса.

Загальні векторні зміщення перманентних станцій Антарктичної тектонічної плити мають хаотичне спрямування, що, очевидно, пояснюється мінімальним впливом відцентрово-інерційних сил у межах геодинамічного бар'єра, що і спричиняє таку неупорядкованість напрямків руху зміщень станцій.

Складові векторів загальних зміщень станцій (зміщення, викликані внутрішніми деформаціями, та зміщення, викликані впливом зовнішніх чинників) мають таке пояснення. Як бачимо з рис. 1, вектори, викликані внутрішніми деформаціями, утворюють ротаційне поле з фіксованим центром обертання. Напрямок векторів внутрішніх деформацій Антарктичної плити спрямований за годинниковою стрілкою, з точки зору ВІМ він мав би бути зворотнім, тобто збігатися з напрямком інерційних сил, які мають широтне спрямування. Це явище можливо знайде своє пояснення у майбутніх дослідженнях.

Що стосується векторів зміщень, викликаних зовнішнім впливом, то вони орієнтовані у північно-західному напрямку. Це пояснюється існуванням між Антарктичною та Австралійською плитами зони спредингу (рис. 2), яка спричиняє певний тиск на Антарктиду у північно-західному напрямку. Ще одним фактором, який пояснює напрямок руху цих векторів, є наявність потрійного зчленування Буве (ПЗБ) на північний захід від Антарктиди. Тут контактують між собою три плити: Південно-Американська, Африканська і Антарктична. ПЗБ характеризується дуже великою різноманітністю вулканітів, що свідчить про гетерогенність мантійних джерел та значну плюмову активність [3]. Отже, у районі ПЗБ є, очевидно, тонка ослаблена океанічна кора, яка не може створювати серйозних перепон для руху Антарктичної плити у цьому напрямку.

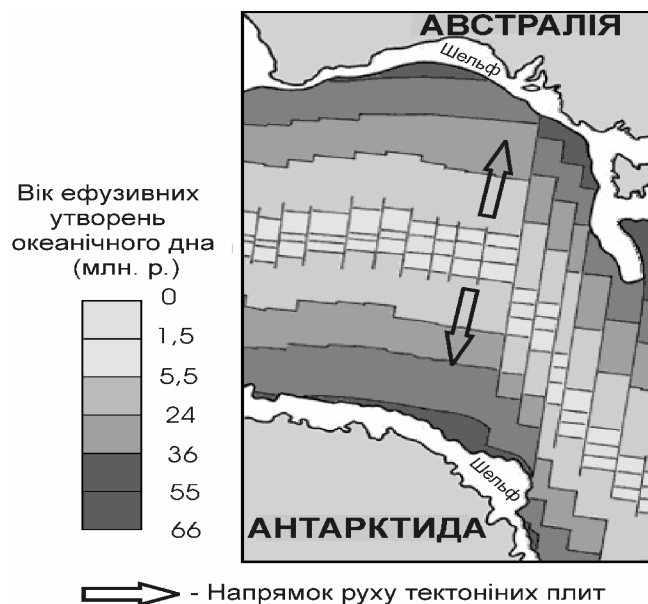


Рис. 2. Зона спредингу між Антарктичною та Австралійською тектонічними плитами

На окрему оцінку заслуговують вектори зміщень геодезичних пунктів, розташованих на території Антарктичного півострова, які були визначені в результаті повторних GPS-спостережень, які проводяться з 1995 р. під егідою SCAR [5]. Як бачимо, на рис. 2 вони мають чітке північно-східне спрямування.

Такий характер рухів на території Антарктичного півострова пояснюється тим, що його північно-західна частина знаходиться за межами геодинамічного бар'єра і підлягає впливу зсувних, меридіонального напрямку відцентрових сил і сил Коріоліса (рис. 3). Оскільки Антарктичний півострів є окремою тектонічною плитою, то і ті його частини, які знаходяться всередині геодинамічного бар'єра, теж рухаються у північно-східному напрямку.

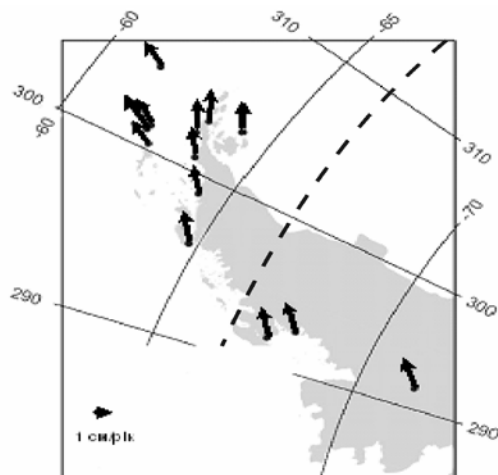


Рис. 3. Вектори швидкостей абсолютних зміщень на території Антарктичного півострова [5]

#### Висновки:

1. Особливості сучасних рухів Антарктичної плити, зокрема різноспрямованість загальних векторів руху перманентних станцій пояснюється, очевидно, наявністю геодинамічного бар'єра навколо материка Антарктида на рівні широти полярного кола; природа цієї границі поки що не зовсім зрозуміла.

2. Ротаційний характер векторів, можливо, викликаний внутрішніми деформаціями і спрямований у широтному напрямку за годинниковою стрілкою. Це явище не знаходить пояснення з точки зору ВІМ і навіть суперечить цій теорії.

3. Напрямок векторів руху перманентних станцій, зумовлений дією зовнішніх чинників, спрямований у північно-західному напрямку, спричинений тиском зони спредингу, яка розташована між Антарктичною і Індо-Австралійською плитами. Наявність у північно-західному напрямку тонкої, ослабленої земної кори потрібного зчленування Буве не може бути перепорою для руху Антарктичної плити у цьому напрямку і лише підтверджує цей факт.

4. Однонаправленість векторів руху геодезичних пунктів мікроплити Антарктичного півострова на північний схід пов'язана з тим, що частина півострова знаходиться за межами геодинамічного бар'єра і потрапляє під дію відцентрових сил і сил Коріоліса. Отже, напрям руху Антарктичного півострова відмінний від рухів Антарктиди, очевидно, підтверджує наявність геодинамічної границі, яка збігається з широтою Полярного кола.

5. Застосування відцентрово-інерційного механізму для пояснення природи тектоніки літосферних плит у планетарній системі Сонце–Земля, очевидно, може бути лише частковим. Дійсна природа тектонічних рухів є набагато складнішою і роль ВІМ не є визначальною.

1. Третьяк К.Р., Голубінка Ю.І. Диференціація кінематики Антарктичної тектонічної плити за даними перманентних GPS-станцій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів. – 2005. – Вип. 2. – С. 113–119. 2. Бахмутов В.Г. Геологическое строение и палеомагнитные исследования в западной Антарктике (район Аргентинских островов) и их значение для

палеотектонических реконструкций Антарктического полуострова // Бюллетень УАЦ. – К., 2002. – Вып. 4. – С. 11–24. 3. Кокс А., Харт Р. Тектоника плит / Пер. з англ. – М.: Мир, 1989. – 427 с. 4. Молчанов В.И., Параев В.В. Центробежно-инерционный механизм глобальной тектоники литосферных плит / Электронный научно-информационный журнал. – 2004. – №1(22). 5. Deitrich R., Dach R., et al, ITRF coordinates and plate velocities from repeated GPS campaigns in Antarctica – an analysis based on different individual solutions // Journal of Geodesy. – 2001. – Вып. 74. – С. 756–766.

УДК 528.3:551.5

**В.О. Літинський, О.В. Кіселик**  
Національний університет “Львівська політехніка”

**С.В. Літинський**  
Львівський національний університет імені Івана Франка

## ВРАХУВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ РЕФРАКЦІЇ В НІВЕЛІРНИХ ХОДАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРИБЛАДІВ ЗАРЯДОВОГО ЗВ’ЯЗКУ

© Літинський В.О., Кіселик О.В., Літинський С.В., 2006

*Запропоновано методику врахування диференціальної нівелірної рефракції під час прокладання ходів з великими перевищеннями. Показано, що не для усіх висот візирного променя коливання зображень адекватно відображають аномальну частину вертикальної рефракції.*

*Method of accounting of differential leveling refraction for lines with large elevations is presented in this paper. It is shown that images fluctuations could be used for adequate representing of abnormal part of vertical refraction not for every height of direction line.*

**Постановка проблеми.** Найбільший вплив на точність прецезійного геометричного нівелювання у ходах зі значними перевищеннями має вертикальна рефракція.

**Зв’язок із науковими та практичними завданнями.** Вплив вертикальної рефракції у денний період, коли температура повітря із висотою падає, то навіть у так звані ранішню та вечірню видності вплив вертикальної рефракції під час нівелювання зменшуватиме вимірне перевищення. Вивчення закономірностей впливу рефракції на відліки рейок допоможе зменшити похибки у визначуванних перевищеннях. На нашу думку, сьогодні переважна більшість значних перевищень визначена геометричним нівелюванням з похибками. Ці похибки для однакових зовнішніх умов є прямо пропорційними до величин перевищень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення розглядуваної проблеми.** Продовжуючи дослідження, започатковані у [4, 5], та аналізуючи [1, 2, 7, 8], бачимо, що проблематика з врахування впливу вертикальної рефракції і сьогодні є актуальною.

**Невирішені частини загальної проблеми.** Сьогодні діюча Інструкція з нівелювання [3] не має ніяких застережень щодо врахування впливу вертикальної рефракції, величина якої вже через 0,5 години після періоду нульових вертикальних температурних градієнтів сягає у сонячні дні 0,2–0,3 мм на одній станції для перевищень 1,5 – 2,0 м і плечей близько 50 м. Врахування впливу вертикальної рефракції, запропонованої в [1], способом візуальної фіксації дрижань зображень, дає значний ефект, але є складним під час вимірювань. Із опрацьованої літератури не дуже зрозуміло, чи дрижання зображень рейок однаково і адекватно відображають величину аномальної рефракції для різних еквівалентних висот візирного променя.