

## МАГНІТОГРАФІЧНІ ТА СПЕКТРАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ В АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА В 1975–1980 рр.

*1975 р. в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка встановлений і почав діяти магнітограф повного вектора конструкції СибІЗМІР, і це ініціювало створення в обсерваторії нового перспективного наукового напрямку – вимірювання сонячних магнітних полів як магнітографічним, так і спектрально-поляризаційним методом. У цій статті наведено короткий огляд хронології подій у перші 5 років існування нового напрямку, а також найважливіших наукових результатів у цей період. Зокрема, тоді отримано нові дані про існування магнітних полів напруженістю  $\approx 10$  кГс в активних областях на Сонці, про дискретність напруженостей у субтелескопічних структурах із дуже сильними полями, а також дані про суттєве пригнічення в них турбулентних рухів. Відповідні висновки підтверджено і деталізовано новими подальшими дослідженнями.*

**Ключові слова:** Сонце, сонячна активність, спектральні дослідження, ефект Зеємана, магнітні поля, сонячний магнітограф.

**Вступ.** 2020 р. минуло 45 років із того часу, як в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (далі – АО КНУ) розпочалися вимірювання і дослідження сонячних магнітних полів спектральними методами. Цей новий напрям досліджень Сонця з'явився в АО КНУ завдяки Павлу Родіоновичу Романчуку, тодішньому директору обсерваторії. Керуючи тоді відділом прогнозування сонячної активності, він як учений і директор обсерваторії розумів гостру потребу в отриманні оперативних даних про сонячні магнітні поля, починаючи з напруженостей і полярностей магнітних полів у сонячних плямах, горизонтальних градієнтів магнітного поля тощо. Тоді уявлялося, що особливо цінними можуть бути магнітограми активних областей, з детальними панорамними даними про структуру й еволюцію магнітних полів як у сонячних плямах, так і за їхніми межами. У ті роки, такі дані отримували лише деякі обсерваторії, зокрема – Кримська астрофізична обсерваторія (нижче – КрАО), Сибірський інститут земного магнетизму, іоносфери і розповсюдження радіохвиль у м. Іркутську (СибІЗМІР), Пулковська астрономічна обсерваторія, обсерваторія Кітт Пік у США. Тоді ще не було інтернету і не було можливості швидкого обміну відповідними даними. Тому П. Р. Романчук поставив завдання розпочати вимірювання сонячних магнітних полів в АО КНУ, придбавши і встановивши в обсерваторії магнітограф повного вектора магнітного поля, який би давав відповідні дані у вигляді карт магнітного поля. Оскільки сонячний магнітограф – досить складний пристрій для астрономічних спостережень, виникла потреба підготовки кваліфікованих фахівців із співробітників обсерваторії, які могли б обслуговувати магнітограф, отримувати й аналізувати спостережні дані.

Метою цієї статті є короткий виклад хронології тих подій в АО КНУ, а також наукових результатів у цьому напрямку, отриманих у 1975–1980 рр.

**Установлення магнітографа і початок вимірювань магнітних полів на Сонці.** АО КНУ придбала сонячний магнітограф конструкції СибІЗМІР [9] 1975 р. за 66 тис. руб. Сонячний магнітограф цього типу не є самостійним астрономічним інструментом – він монтується як оптико-електронна приставка до сонячного телескопа, оснащеного спектрографом високої роздільної здатності. Ширина інструментального профілю такого спектрографа має бути меншою за  $0,1 \text{ \AA}$ , тобто за ширину вузьких ліній нейтрального заліза Fe I у сонячному спектрі, подібних до Fe I 5250,2  $\text{\AA}$ . У ті роки, для магнітографічних вимірювань найчастіше використовувалась саме ця спектральна лінія з досить великим фактором Ланде ( $g = 3,0$ ), що забезпечувало високу чутливість вимірювань.

Сонячний магнітограф був встановлений на ешелюному спектрографі горизонтального сонячного телескопа (нижче – ГСТ) обсерваторії [7]. Спершу ГСТ був оснащений звичайним (неешельним) дифракційним спектрографом [18], однак пізніше (на початку 1970-х рр.) цей спектрограф замінено на ешелюний. Очевидною перевагою ешелюного спектрографа є те, що він дозволяє за одну експозицію тривалістю у кілька секунд зафіксувати на фотопластинці спектр Сонця у дуже широкому діапазоні довжин хвиль – від 3800 до 6600  $\text{\AA}$ . Це дуже важливо для досліджень активних процесів на Сонці, зокрема сонячних спалахів, оскільки для визначення фізичних умов у них необхідно мати спостережені профілі багатьох спектральних ліній, зафіксовані одночасно – наприклад, профілі лінії бальмерівської серії водню.

Сонячний телескоп і спектрограф створено співробітниками обсерваторії у 1953–54 рр. і потім неодноразово модернізовано [8,13,18]. Спершу ці роботи проводились під керівництвом Миколи Авеніровича Яковкіна, завідувача відділом фізики Сонця, а потім Лева Миколайовича Курочки, завідувача відділом фізики і прогнозів хромосферних спалахів. У роботах із проєктування і побудови інструмента безпосередню участь брали старші наукові співробітники П. М. Полупан і М. В. Стешенко, а також завідувач механічною майстернею П. Д. Рубан і механік О. С. Бенюх. Роботи з модернізації інструмента виконувались за участі В. О. Остапенка, Ю. А. Чеснока, Л. М. Кожевнікова та ін. До 1975 р. на спектральному матеріалі з ГСТ АО КНУ отримано важливі наукові результати, які стосуються дослідження фізичних умов у сонячних протуберанцях, спалахах і плямах. Їх авторами є М. А. Яковкін, П. М. Полупан, Є. М. Земанек (рис. 1), а також М. В. Братійчук, Л. М. Курочка та ін. [1].

Для встановлення магнітографа на ГСТ АО КНУ, із СибІЗМІР (м. Іркутськ) приїхали два співробітники цього інституту, Микола Ілларіонович Кобанов і Сергій Володимирович Александрович (рис. 2). Їм довелося оригінально вирішити ситуацію з установленням плити фотометра магнітографа, враховуючи те, що напрямок спектральної дисперсії на ешелюному спектрографі ГСТ відповідає вертикальній площині, а не горизонтальній, як на звичайному (неешельному) дифракційному спектрографі. Цю плиту довелося встановити вертикально, щоб правильно використати зафіксовану орієнтацію пари вхідних щілин фотометра магнітографа, на які проєктуються крила магніточутливої лінії.



**Рис. 1.** Спектроскопісти-сонячники, які започаткували київську школу дослідження активних утворень на Сонці, вивели її на світовий рівень і залишили нам у спадок ГСТ з ешелюним спектрографом (зліва направо): Прокіп Миколайович Полупан, Євгенія Миколаївна Земанек і Микола Авенірович Яковкін (фото 1960-х рр.). Це вчителі автора статті, яким він глибоко вдячний за науку

Оскільки сонячний магнітограф конструкції СибІЗМІР є досить складною оптико-електронною системою, для його підтримання в робочому стані, тестування і проведення наукових досліджень потрібні були (як нам було рекомендовано названими співробітниками СибІЗМІР) мінімум двоє інженерів-електронщиків. Це виявилось певною проблемою – спочатку вдалося зарахувати для цих робіт лише одного інженера на пів ставки, Віктора Павловича Полянко. Саме він кілька років обслуговував магнітограф, а пізніше цим почав займатися вже на повну ставку Юрій Андрійович Чеснок. Вимірювання на магнітографі освоювали тоді наукові співробітники Всеволод Григорович Лозицький, Володимир Михайлович Россада, Наталія Йосипівна Лозицька й Ольга Анатоліївна Добродій.

У процесі запису сонячних магнітних полів на магнітографі виявилось, що чутливість вимірювань є досить високою, на рівні 5 Гс, у каналі поздовжнього магнітного поля  $V_{\parallel}$  і 75 Гс у каналі поперечного поля  $V_{\perp}$ . Такі параметри досягалися з фотопомножувачами ФЭУ-79 при сталій інтегруванні сигналу 3 с. Пізніше Кримська астрофізична обсерваторія люб'язно надала АО КНУ англійські фотопомножувачі EMI 6256S із кращим відношенням сигнал/шум, ніж у ФЭУ-79. Глибина модуляції сигналу магнітографа була  $\geq 90\%$  при напрузі на кристали KDP у 3,2 кВ.

Однак у каналі променевих швидкостей шумові ефекти доходили до 0,3 км/с, що приблизно на порядок більше, ніж на магнітографі КрАО. Ці значні шумові ефекти були пов'язані з неусувними коливаннями ґрунту під цегляними опорами (тумбами), на які встановлено металеві кріплення дзеркал ешелюного спектрографа ГСТ. Такі коливання ґрунту були особливо помітними під час руху трамваїв по колії, прокладеній по вул. Воровського (нині – Бульварно-Кудрявській), яка розміщувалася від інструмента всього за  $\approx 200$  м. Саме тоді стало зрозумілим, що використання магнітографа в умовах міського астроклімату може бути не таким успішним як в обсерваторіях, віддалених від великих міст.



**Рис. 2.** Співробітники СибІЗМІР С. В. Александрович (ліворуч) і М. І. Кобанов, які 1975 р. встановили на ГСТ сонячний магнітограф повного вектора. На цьому фото – також Галина Кобанова (ліворуч) і Наталія Лозицька

Ще однією причиною стриманого відношення до можливостей магнітографа стало те, що відповідні вимірювання були неоднозначними в області сонячних плям. Магнітограф СибІЗМІР, як і магнітограф Беккока [3], має пару вихідних щілин фотометра, установлених у найбільш крутих ділянках профілю магніточутливої лінії. Величина магнітного поля визначається у цьому інструменті не безпосередньо по зєманівському розщепленню  $\Delta\lambda_n$ , а непрямим чином – по амплітуді колової поляризації, тобто по параметру Стокса  $V$ . Але цей параметр залежить не тільки від магнітного поля, але й немагнітних умов, які в межах теорії переносу випромінювання [25] описуються селективним коефіцієнтом поглинання  $\eta_0$  і доплерівською шириною  $\Delta\lambda_D$ . Параметр  $\eta_0$  для лінії FeI 5250,2 дуже суттєво змінюється при переході від фотосфери до сонячної плями – до двох разів. Це призводить до того, що калібровка вимірювань магнітографа, здійснена по спектрах за межами сонячних плям, стає помилковою для самих сонячних плям. Щоб усунути цю помилковість, акад. А. Б. Северний здійснив у КрАО лабораторну калібровку [19], порівнявши магнітографічні сигнали у плямах із безпосередніми вимірюваннями магнітного поля на основі прямих спектральних спостережень. Проте відповідне порівняння привело до неоднозначних висновків: виявилось, що лабораторна калібровочна крива дуже відрізняється від теоретичної і є досить розсіяною, неоднаковою для різних сонячних плям. Унаслідок цього, відповідні похибки вимірювань досягали 200–300 %.

Про незрозумілі питання калібровки магнітографічних вимірювань свідчило також порівняння спостережних даних, отриманих у різних спектральних лініях. Виявлено, що лінія FeI 5250,2 показує у 2–3 рази менші виміряні напруженості [5], ніж лінія FeI 5232,9, хоч обидві лінії є фотосферними, тобто вони формуються, у середньому, приблизно на однаковій висоті у сонячній атмосфері. Цей результат підтверджено також вимірюваннями, виконаними на магнітографі СибІЗМІР, установленому на ГСТ АО КНУ. Автори роботи [5] пояснювали цей ефект вищою температурною чутливістю лінії FeI 5250,2, внаслідок якої вона суттєво ослаблюється у магнітних ділянках за межами сонячних плям і тим самим фіктивно зменшує сигнал магнітографа. Однак на магнітографі КрАО було виявлено ще один загадковий ефект – залежність поздовжнього магнітного поля  $V_{||}$  від фактора  $g\lambda^2$  магніточутливої лінії [4]. Ця залежність має такий вигляд, що у певному інтервалі  $g\lambda^2$  вимірювання по різних спектральних лініях задовільно узгоджуються між собою, але для ліній із найменшою магнітною чутливістю існує така тенденція: виміряне магнітне поле  $V_{||}$  тим більше, чим менший фактор  $g\lambda^2$ . Ця тенденція не мала тоді задовільного пояснення і наводила на думку, що для з'ясування цих незрозумілих питань слід аналізувати не магнітографічні дані, а спектрально-поляризаційні вимірювання, тобто безпосередньо ті спектральні спостереження з ешельним спектрографом, які дозволяють одночасно зіставляти магнітні розщеплення дуже багатьох спектральних ліній.



Рис. 3. В. Е. Степанов (ліворуч) і В. Й. Скоморовський на великому Саянському коронографі. Автор статті дуже вдячний Валерію Йосиповичу за виготовлення високоякісної поляризаційної оптики для вимірювань магнітних полів на ГСТ АО КНУ

Для спектрально-поляризаційних спостережень необхідно було придбати і встановити на ГСТ АО КНУ відповідну поляризаційну оптику. Така оптика була виготовлена також у СибІЗМІР Валерієм Йосиповичем Скоморовським (рис. 3), доктором фізико-математичних наук, головним науковим співробітником Інституту сонячно-земної фізики РАН (<https://www.researchgate.net/profile/Valery-Skomorovsky-2>). Вона виготовлена у двох варіантах: (1) – пластинка  $\lambda/4$  + поляризаційна мозаїка Скоморовського [21], (2) – пластинка  $\lambda/4$  + призма-розщеплювач з ісландського шпату (аналог призми Волластона, однак із паралельним ходом двох променів з ортогональною лінійною поляризацією на виході з призми). В обох варіантах вказані оптичні елементи утворюють аналізатор колової (циркулярної) поляризації, однак із такими суттєвими відмінностями. У першому варіанті весь аналізатор установлюється перед вхідною щілиною спектрографа і, таким чином, не впливає на фокусування і юстування спектрографа. Оскільки ширина смужок мозаїки дорівнює 0,4 мм (що у випадку ГСТ АО КНУ відповідає 6" на Сонці), відповідні вимірювання магнітних розщеплень і визначення полярностей магнітного поля можна робити з дискретністю також 6", що цілком прийнятно для великих сонячних плям із діаметром півніні більше 30". Однак із таким аналізатором менш зручно вивчати магнітні поля у менших масштабах, наприклад, 2–3". У цьому випадку більш придатний аналізатор другого типу, який допускає магнітні вимірювання зі значно меншою (формально – нульовою) дискретністю. У такому

варіанті, пластинка  $\lambda/4$  ставиться перед вхідною щілиною спектрографа, а призма-розщеплювач – за вхідною щілиною. Це змінює положення краєвих фокусів у системі спектрографа і самі ці фокуси доводиться тоді підбирати емпірично (з точністю 1 мм), фотографуючи спектри за різних положень дзеркал спектрографа. Оскільки товщина призми-розщеплювача по ходу променів дорівнює 3 см, то на виході з призми отримують два промені з ортогональною лінійною поляризацією, які просторово рознесені на 3 мм. Це створює у фокальній площині камери спектрографа два зображення спектра, які також рознесені просторово приблизно на ту саму величину, оскільки фокусні віддалі коліматорного і камерного дзеркал спектрографа є близькими – вони дорівнюють 600 см і 650 см, відповідно. Ці два спектри відповідають комбінаціям стокових параметрів  $I + V$  та  $I - V$ .

Починаючи з 1975 р., на ГСТ проводились регулярні візуальні вимірювання магнітних полів сонячних плям і визначення їхніх полярностей із використанням аналізатора поляризації першого типу. Для більш зручного вимірювання зєсманівського розщеплення спектральних ліній, інженером Леонідом Михайловичем Кожевніковим виготовлено спеціальний лайншіфтер на основі плоско-паралельної скляної пластинки, кут повороту якої був проградуирований у напруженостях для випадку лінії Fe I 5250,2. До візуальних вимірювань магнітного поля на ГСТ АО КНУ залучалися такі співробітники: Марія Юдківна Зельдіна, Катерина Григорівна Руднікова, Тамара Іванівна Редюк, Євгенія Василівна Курочка та ін.

Починаючи з 1975 р., на ГСТ проводилося фотографування ешельних спектрів сонячних плям із використанням пластинки  $\lambda/4$  і мозаїки Скоморівського [21]. Причому використовувались в основному фотопластинки WP1 ORWO при експозиціях у 5–20 с, які проявлялись у проявнику Д-76. Пізніше для цього почали використовувати простіший проявник Д-23. Отримані зєсман-спектрограми фотометрувались на мікрофотометрі МФ-4 й оброблялися вручну для підвищення точності опрацювання даних. Зазначимо, що аналогічне опрацювання можна було робити за допомогою оригінального пристрою – інтенсиграфа, придуманого і створеного М. А. Яковкіним. Інтенсиграф забезпечував швидше опрацювання даних фотометрії (з переведенням почорнінь в інтенсивності відповідно до певної характеристичної кривої фотоматеріалу), однак він був більш придатний для вивчення широких та інтенсивних спалахових емісій, передусім у лініях бальмерівської серії водню і лініях іонізованого кальцію. Щодо вузьких ліній заліза типу Fe I 5250,2 Å, то максимальна точність у переведенні почорнінь в інтенсивності досягалася саме ручним способом, при якому відліки почорнінь не записувалися на фотопластинку, а знімалися (з точністю до 1 поділки) безпосередньо зі шкали цифрового вольтметра. Зрозуміло, це робило опрацювання спостережних даних дуже трудомістким і тривалим. Однак на це доводилося йти, щоб із максимальною точністю дослідити дуже тонкі спектральні ефекти у профілях магнітоточливих ліній.

**Наукові результати.** У 1975–1976 рр. на магнітографі АО КНУ були розпочаті роботи з вивчення впливу температурної чутливості лінії Fe I 5250,2 Å на величину напруженості магнітного поля, виміряну за межами сонячних плям. Як уже сказано вище, згідно з дослідженнями Гарві і Лівінгстона [5], унаслідок температурної чутливості цієї лінії можлива значна (у 2–5 разів) недооцінка справжніх напруженостей.

Розрахунки, виконані в межах теорії Унно [25], показали, що якщо спостерігати лінію Fe I 5250,2 Å у неполяризованому світлі, то при відносно слабких полях  $0 < B \leq 250$  Гс і незмінному коефіцієнті поглинання  $\eta_0$  маємо досить незначні ( $\leq 5\%$ ) зміни параметра  $\partial I/\partial \lambda$  її крил, якому пропорційний параметр Стокса  $V$  (а отже, і сигнал магнітографа в каналі поздовжнього поля):

$$V = (\partial I/\partial \lambda) \Delta \lambda_n \cos \gamma, \quad (1)$$

де  $\Delta \lambda_n$  – зєсманівське розщеплення,  $\gamma$  – кут між силовою лінією магнітного поля і променем зору. Це значить, що і запис сигналів магнітного поля з напруженістю  $< 250$  Гс, і їхню калібровку, можна робити в одних і тих самих місцях на Сонці. Відповідна калібровка повинна бути вільною від впливу ефекту температури у профілі вказаної спектральної лінії. Оцінити ефект температури можна тоді, коли порівняти вказані вимірювання зі звичайними (які стосуються тих самих магнітних ділянок за межами сонячних плям), при яких калібровочний запис робиться у незбурених областях на східному і західному краях диска Сонця або ж у його центрі.

Згідно з попередніми даними (усього виконано близько 10 вимірювань), температурний ефект у профілі лінії Fe I 5250,2 Å виявився відносно слабким: він міг призвести до заниження вимірювань  $V_{||}$  на 20–30%. Ці попередні результати не були опубліковані у науковій статті, однак описані у кандидатській дисертації В. Г. Лозицького [14].

Перші опубліковані наукові результати щодо вимірювань сонячних магнітних полів отримано в обсерваторії спектральним методом на основі аналізу спостережних даних КрАО, люб'язно наданих для опрацювання старшим науковим співробітником цієї обсерваторії Теодором Теодоровичем Цапом із дозволу дирекції цієї обсерваторії. Досліджувались ешельні спектри трьох сонячних спалахів балів 1 і 3, отримані без поляризаційної оптики на баштовому сонячному телескопі КрАО у такі дати: 17.08.1959 р. (група № 403 по нумерації бюлетеня "Солнечные данные"), 30.08.1960 р. (група № 346) і 11.10.1960 р. (група № 216). У групах № 403 і 216 вхідна щілина спектрографа перетинала зображення не лише вузлів емісії сонячних спалахів, але і невеликих сонячних плям, де лінія Fe I 5250,2 Å була помітно розширена. У цьому випадку градієнт інтенсивності  $\partial I/\partial \lambda$  в її крилах суттєво зменшувався. Т. Т. Цап, керуючи тоді науковою роботою В. Г. Лозицького, поставив таке завдання: з'ясувати, як ця зміна параметра  $\partial I/\partial \lambda$  може вплинути на сигнали магнітографа?

Оскільки спостережні дані охоплювали ділянки сонячних плям, наближення слабого поля вже було незастосовне, а наведена вище формула (1) – не могла бути використана. Тому знайдено інший підхід – були розраховані величини параметра  $\partial I/\partial \lambda$  за теорією Унно [25] для однорідного поля і теоретичні значення зіставлялись зі спостереженими для 8 спектральних ліній із різними факторами  $g\lambda^2$ . У цьому разі розглядалися різні пари спектральних ліній; теоретичні залежності підбиралися так, щоб вони найближче відповідали спостереженням [15,16].

Це виявило цікаву закономірність: для спектральних ліній із високою магнітною чутливістю, для яких  $g\lambda^2 = 55 \div 100$ , відносні напруженості  $R_i = V_{||}(\lambda_i)/V_{||}(610,3)$  було отримано практично однаковими, тоді як для ліній із  $g\lambda^2 < 50$  – тим більшими, чим менший фактор  $g\lambda^2$ . Указаний результат показано на рис. 4, на якому кружками зображено магнітографічні

дані [4] для слабких ( $B_{\parallel} \leq 100$  Гс) магнітних полів, а трикутниками – фотографічні дані [15, 16] для більш сильних полів ( $B \leq 1000$  Гс). З рисунка видно, що незважаючи на те, що перші дані отримано з аналізу параметра Стокса  $V$ , а другі – параметра  $I$ , загальний вигляд обох залежностей  $R_i = f(g\lambda^2)$  є дуже подібним. Враховуючи цю обставину, таку залежність не можна пояснити чисто поляризаційними ефектами (наприклад, інструментальною поляризацією). Значно ймовірніше, що це все-таки сонячний ефект, який чомусь виникає у ліній із найменшою магнітною чутливістю.

Найвірогідніше пояснення отриманої залежності полягає у тому, що це результат присутності просторово нероздільних магнітних полів із високою напруженістю (ніби невидимих у разі прямого розділення "маленьких сонячних плям"), які давали ефект, подібний до ефекту "насичення" сигналу магнітографа [19]. Суть його полягає у тому, що за фіксованих щілин фотометра магнітографа частина сигналу зєсманівської поляризації у профілі лінії втрачається у разі підвищення напруженості магнітного поля, притому тим більша його частина, чим сильніше магнітне поле. Причина дуже проста: у випадку збільшення магнітного розщеплення зєсманівської  $\sigma$ -компоненти розщеплюються настільки сильно, що виходять за межі щілин фотометра магнітографа або за межі тих ділянок профілю, для яких аналізувався параметр  $\partial I / \partial \lambda$ . На основі цієї ідеї Стенфло [24] запропонував метод "відношення ліній" для аналізу магнітографічних спостережень у лініях Fe I 5247,1 і 5250,2 з дуже різними факторами Ланде (2,0 і 3,0, відповідно), але з майже однаковими глибинами формування в атмосфері Сонця і температурними чутливостями. Стенфло дійшов висновку про те, що напруженість магнітного поля у просторово нероздільних силових трубках досягає 1100–2300 Гс навіть у ділянках "спокійного" Сонця, де не було сонячних плям.

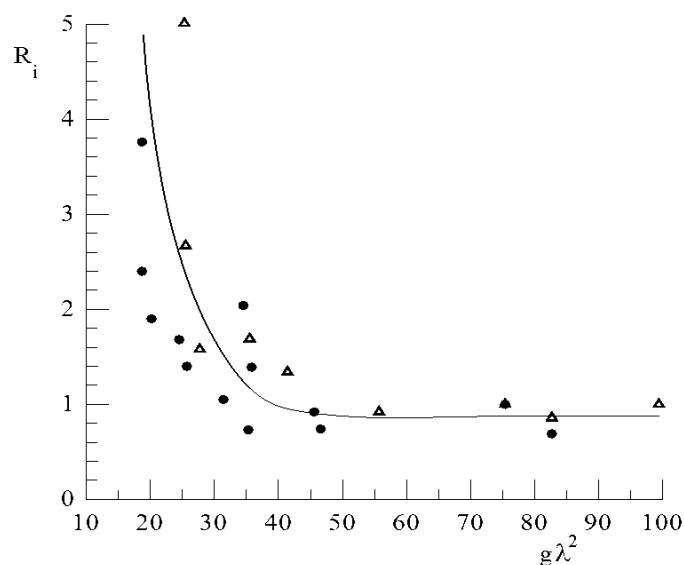


Рис 4. Спостережені залежності відносних напруженостей  $R_i = B_{\parallel}(\lambda_i)/B_{\parallel}(6102,7)$  від фактора магнітної чутливості  $g\lambda^2$  спектральних ліній, який для зручності у порівнюваних даних подано без множника  $10^6$  [12]

Розрахунки методом "відношення ліній" показали, що показану на рис. 4 залежність можна пояснити у разі значно сильніших магнітних полів, близько 10 кГс [12]. Результати відповідних модельних розрахунків представлено на цьому рисунку плавною кривою, яка отримана при двокомпонентній структурі магнітного поля, яка включала більш слабку фонову компоненту з напруженостями  $B_b < 1$  кГс і сильну компоненту з фактором заповнення  $f$  і напруженістю  $B_s \approx 10$  кГс. У цій моделі, величина фонового поля і фактора заповнення пов'язані між собою простим співвідношенням:  $B_b / f \approx 1$  кГс, з якого випливає, що фонове поле є тим сильнішим, чим більший фактор заповнення силових трубок. Останнє може вказувати на те, що фактично це фонове не є істинно фоновим полем, в яке "вкраплені" силові трубки з високою напруженістю, а являє собою периферійні частини самих силових трубок, які при їхньому змиканні (за збільшення фактора заповнення) утворюють усе сильніше поле у проміжку між центрами силових трубок. Незважаючи на те, що це питання було поставлено ще 40 років тому, проте ще й сьогодні воно не має зрозумілої відповіді.

Слід зауважити, що напруженості  $\approx 10$  кГс є дуже високими – вони значно перевищують добре відомі магнітні поля у сонячних плямах. Згідно з прямими вимірюваннями у разі великих факторів заповнення ( $f \approx 1$ ), напруженості магнітного поля у розвинутих сонячних плямах (з тінню і півтінню) типово дорівнюють 2–3 кГс, і дуже зрідка складають 5–6 кГс [10, 22]. У спектрах сонячних плям знайдено слабкі спектральні особливості, які відповідають магнітному полю  $\approx 8$  кГс і фактору заповнення  $f \leq 0,2-0,3$  [13, 17].

Також слід зазначити, що припущення про магнітні поля в діапазоні 4–10 кГс раніше вже висловлювались іншими авторами і вони стосувались сонячних спалахів [2], а також протуберанців типу "штрихів" [20]. Однак на той час були й інші значно скромніші оцінки магнітного поля у сонячних спалахах ( $\leq 1$  кГс) [6], і тому це питання, у цілому, залишалось дискусійним.

У 1977–1980 рр. отримано нові аргументи на користь надсильних магнітних полів в активних областях на Сонці, притому за спостережними даними з ГСТ АО КНУ. Зокрема, детально проаналізовано зєсман-спектрограму ділянки активної області між двома невеликими плямами однакової поляризації, яка спостерігалась 12.10.1977 р. поблизу центра диска Сонця [12,14]. Згідно з прямими вимірюваннями зєсманівського розщеплення в лінії Fe I 5250,2, напруженість магнітного поля у сонячних плямах була 1000–1100 Гс, тоді як у дослідженій ділянці фотосфери між

плямами – не більше 600 Гс. В останньому випадку визначалось ефективне магнітне поле  $B_{\text{eff}}$ , виміряне по зміщенню "центрів ваги" профілів  $I + V$  та  $I - V$ .

Оскільки за даними роботи [24] величина виміряного магнітного поля залежала також від віддалі  $\Delta\lambda$  від центра лінії, було досліджено цю залежність за спостережними даними, які включали  $I \pm V$  профілі восьми фотосферних ліній. Для зменшення шумових ефектів унаслідок зернистості фотоемулсії WP1 ORWO, виміряні розщеплення профілів усереднювались по ділянці  $\approx 35$  с дуги на Сонці. Завдяки цьому похибки вимірювань було знижено до рівня  $\pm 25$  Гс для лінії FeI 5250,2.

Отримані результати представлено на рис. 5, де по осі ординат зображено розщеплення бісекторів  $\Delta\lambda_B$ . Цей параметр, фактично, є середнім розщепленням профілів  $I \pm V$  ліворуч і праворуч від їхніх центрів на вибраній віддалі  $\Delta\lambda$ . Таке усереднення робилося також для зменшення впливу "шумів" на отримані результати.

З рисунка видно, що зіставлення залежностей " $\Delta\lambda_B - \Delta\lambda$ " для всіх ліній дає в цілому хаотичну картину. Хоча всі вивчені лінії є фотосферними, одні з них показують зростання  $\Delta\lambda_B$  від центра до крил (тобто до більших значень  $\Delta\lambda$ ), інші – зворотний ефект. Це не можна пояснити висотними змінами магнітного поля, враховуючи те, що ядро фраунгоферової лінії формується в атмосфері вище, а крила – нижче. Адаже тоді доведеться припустити різний знак висотного градієнта магнітного поля, що фізично нереально.

Однак картина значно прояснюється, якщо розглянути залежність  $\Delta\lambda_B$  не від  $\Delta\lambda$ , а від  $\Delta\lambda/g_{\text{eff}}\lambda_0^2$  (рис. 6). Видно, що дані по різних лініях значно краще корелюють між собою, утворюючи деяку немонотонну залежність із двома максимумами.

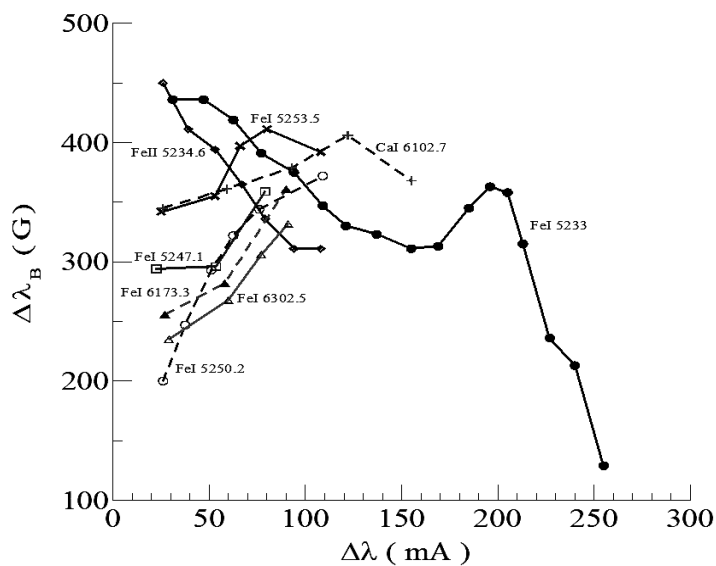


Рис 5. Зіставлення виміряних розщеплень бісекторів  $\Delta\lambda_B$  профілів  $I \pm V$  на графіку залежності від віддалі  $\Delta\lambda$  від їхніх центрів магніточутливих ліній для фотосфери активної області 12.10.1977 р.

Щоб зрозуміти, чому це так сталося, слід нагадати, що зєсманівське розщеплення  $\Delta\lambda_H$  описується формулою

$$\Delta\lambda_H = 4,67 \times 10^{-13} g_{\text{eff}} \lambda_0^2 B, \quad (2)$$

де  $\Delta\lambda_H$  і  $\lambda_0$  виражені в ангстремах,  $g_{\text{eff}}$  – ефективний фактор Ланде лінії,  $B$  – модуль напруженості магнітного поля;  $\lambda_0$  – довжина хвилі спектральної лінії.

З формули випливає, що  $B \propto \Delta\lambda_H / (g_{\text{eff}} \lambda_0^2)$ . Отже, якщо на рис. 6 розглядається величина  $\Delta\lambda_B$  залежно від параметра  $\Delta\lambda / (g_{\text{eff}} \lambda_0^2)$ , то тим самим, фактично, розглядається залежність від величини магнітного поля  $B$ . Максимуми на рис. 6, таким чином, відповідають певним напруженостям магнітного поля, приблизно однаковим для всіх спектральних ліній і таким, для яких зєсманівське розщеплення лінії FeI 5250,2 чисельно рівне горизонтальній координаті відповідного максимуму, тобто  $\Delta\lambda_{\text{max}}(5250,2) = \Delta\lambda_H(5250,2)$ . Оскільки з рис. 6 випливає, що  $\Delta\lambda_{\text{max}}(5250,2) \approx 150$  і  $470$  мА, то відповідні напруженості, згідно з (2), дорівнюють 3900 і 12100 Гс. Пізніше вибірка спектральних ліній була розширена до 16 спектральних ліній і виявилось, що на цій залежності існує ще один максимум, який відповідає напруженостям у 7000–8000 Гс. Статистична достовірність цих максимумів на рівні не менше 2–3 середньоквадратичних похибок.

На основі цих результатів уперше висловлено припущення, що в просторово нероздільних структурах магнітних полів активних областей на Сонці існує дискретність (своєрідна "квантованість") напруженостей магнітного поля. Пізніше цей ефект пояснено в межах теоретичної МГД моделі безсилового екранованого магнітного джгута [23]. Ще один висновок впливав із розгляду отриманих даних: у просторово нероздільних структурах із такими дуже сильними магнітними полями мають бути дуже вузькі спектральні лінії – на 30–50 % вужчі, ніж ті, які звичайно фіксуються за прямих спостережень. Це вказує на значне пригнічення турбулентних рухів у місцях особливо сильних магнітних полів. Аналогічний ефект помічено і у спектрах сонячних спалахів [11]. Детальніше це питання заплановано висвітлити у наступній статті.

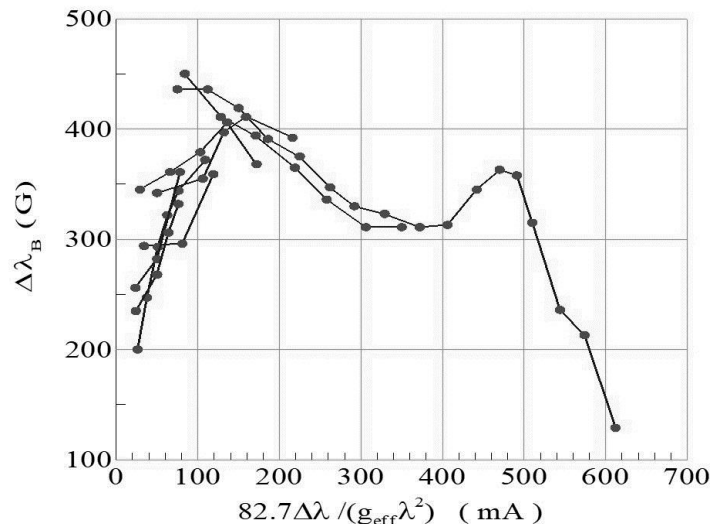


Рис. 6. Зіставлення вимірних розщеплень бісекторів  $\Delta\lambda_B$  профілів  $I \pm V$  на графіку залежності від  $82,7\Delta\lambda/g_{eff}\lambda^2$ . Коефіцієнт 82,7 узятю для того, щоб звести всі дані до лінії FeI 5250,2, у якій  $g_{eff}\lambda^2 = 82,7 \times 10^6$  (див. текст)

**Висновки.** На основі отриманого в АО КНУ досвіду спостережень сонячних магнітних полів у 1975–1980 рр. із магнітографом конструкції СибІЗМІР дійшли висновку, що цей магнітограф в умовах астроклімату Києва не може давати такі цінні у науковому відношенні дані, як ті магнітографи, які використовуються в інших обсерваторіях далеко за межами великих міст. Зокрема, хоч у Києві чутливість вимірювань у каналі поздовжнього магнітного поля була досить високою – близько 5 Гс в каналі поздовжнього поля і 75 Гс в каналі поперечного поля, "шуми" в каналі променевих швидкостей сягали 0,3 км/с, що приблизно на порядок більше, ніж у магнітографі КрАО. Ще однією причиною обмеженого використання магнітографа в АО КНУ було те, що в кінці 1970-х рр. стали очевидними суттєві проблеми калібровки магнітографічних вимірювань, унаслідок чого такі вимірювання в областях сонячних плям могли мати похибки по 200–300 %. Однак придбання магнітографа було правильним рішенням дирекції обсерваторії і передусім тому, що ініціювало створення нового перспективного наукового напрямку – вимірювання сонячних магнітних полів як магнітографічним, так і спектрально-поляризаційним методом. Уже в перші 5 років досліджень у цьому науковому напрямі отримано важливі результати, які стосуються проблеми особливо сильних магнітних полів у сонячній атмосфері, причому ці результати отримані як на спостережному матеріалі КрАО [15, 16], так і АО КНУ [12, 14]. Зокрема, отримано нові дані про існування магнітних полів напруженістю  $\approx 10$  кГс, про дискретність напруженостей у субтелескопічних структурах із дуже сильними полями, а також дані про суттєве пригнічення в них турбулентних рухів. Відповідні висновки підтверджено і деталізовано новими подальшими дослідженнями.

**Подяка.** Автори вдячні невідомому рецензенту за слушні зауваження, які були враховані у процесі доопрацювання статті. Це дослідження профінансовано Київським національним університетом імені Тараса Шевченка, держбюджетна тема № 19БФ023-03.

**Список літератури**

- 175 years of Astronomical Observatory of Kiev University: monograph (175 років Астрономічної обсерваторії Київського університету: монографія) / by V.M.Efimenko, V.M.Ivchenko, B.I.Hnatyk et al. (В.М.Єфіменко, В.М.Івченко, Б.І.Гнатик та ін.); за заг. ред. В.М.Єфіменка, В.М.Івченка. – К.: ВПЦ "Київський університет". – 2020. – 464 с.
- Alkaeva K.V. Zeeman effect in metallic lines of solar flares (Аликаева К.В. Эффект Зеемана в металлических линиях солнечных вспышек) // Астрометрия и астрофизика. – 1969. – Вып. 8. – С. 92–95.
- Babcock H. W. The solar magnetograph // Astrophys. J. – 1953. – Vol. 118. – P. 387–396.
- Gorasyuk S.I., Kotov V.A., Severny A.B., Tsap T.T. The comparison of the magnetographic magnetic field measured in different spectral lines // Solar Phys. – 1973. – Vol. 31, No. 2. – P. 307–316.
- Harvey J., Livingston W. Magnetograph measurements with temperature-sensitive lines // Solar Phys. – 1970. – V. 10, No. 2. – P. 283–293.
- Koval A. N. Photographic measurements of magnetic fields in prominences and flares (Коваль А.Н. Об измерениях магнитных полей в протуберанцах и вспышках фотографическим методом) // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. – 1977. – Т. 57. – С. 133–143.
- Kurochka E.V., Kurochka L.N., Lozitsky V.G. et al., Horizontal solar telescope of Astronomical observatory of Kiev University (Курочка Е.В., Курочка Л.Н., Лоцицкий В.Г., Лоцицкая Н.И., Остапенко В.А., Полупан П.Н., Романчук П.Р., Россада В.М. Горизонтальный солнечный телескоп Астрономической обсерватории Киевского университета) // Вестник Киев. ун-та. Астрономия. – 1980. – Вып. 22. – С.48–56.
- Kurochka L.N., Lozitska N.I., Lozitsky V.G., Nagulin Yu.S. Simultaneous observations of the solar spectrum in the infrared and visible regions with the new echelle spectrograph (Курочка Л.Н., Лоцицкая Н.И., Лоцицкий В.Г., Нагулин Ю.С. Одновременные наблюдения солнечного спектра в инфракрасной и видимой областях с помощью нового эшеллового спектрографа) // Вестник Киевского университета, Астрономия. – 1988. – Вып. 30. – С.46–50
- Kuznetsov D.A., Kuklin G.V., Stepanov V.E. Solar magnetograph and radial velocity recorder (Кузнецов Д.А., Куклин Г.В., Степанов В.Е. Солнечный магнитограф и регистратор лучевых скоростей) // В сб.: Результаты наблюдений и исследований в период МГСС, вып. I. – М.: Наука, 1966. – С. 80–87.
- Livingston, W., Harvey, J.W., Malanushenko O.V. Sunspots with the strongest magnetic fields // Solar Physics. – 2006. – Vol. 239. – P. 41–68.
- Lozitskaya N.I., Lozitsky V.G. Are there "magnetic transients" in solar flares? (Лоцицкая Н.И., Лоцицкий В.Г. Существуют ли "магнитные транзисты" в солнечных вспышках?) // Письма в Астрон. ж-л. – 1982. – Т.8, №8. – С.500–505.
- Lozitsky V.G. Calibration of magnetographic measurements taking into account spatially unresolved inhomogeneities (Лоцицкий В.Г. О калибровке магнитографических измерений с учетом пространственно неразрешимых неоднородностей) // Physica Solariter., Potsdam. – 1980. – No. 14. – P.88–94.
- Lozitsky V.G. Indications of 8-kilogauss magnetic field existence in the sunspot umbra // Advances in Space Research. – 2016. – Vol. 57. – P. 398–407.
- Lozitsky V.G. Measurements of magnetic fields in active regions of the Sun (Лоцицкий В.Г. Измерения магнитных полей в активных областях Солнца). 01.03.02 – Астрофизика. Диссерт. канд.физ.-мат. наук, Киев. – 1983. – 164 с.
- Lozitsky V.G. On the contours of magnetically sensitive lines in active regions of the Sun (Лоцицкий В.Г. О контурах магниточувствительных линий в активных областях Солнца) // Астрометрия и астрофизика. – 1979. – Вып.38. – С.13–28.
- Lozitsky V.G. On the issue of calibrating solar magnetograph measurements, I (Лоцицкий В.Г. К вопросу о калибровке измерений солнечного магнитографа, I) // Солнечные данные. – 1978. – № 8. – С.74–81.

17. Lozitsky V.G. Spectral manifestations of extremely strong magnetic fields in the sunspot umbra // *Advances in Space Research*. – 2017. – Vol. 59. – P. 1416–1424.
18. Polupan P.N. Solar installation (Полупан П.Н. Солнечная установка) // Публикации Киевской астрономической обсерватории. – 1962. – № 10. С. 59–64.
19. Severny A.B. Calibration of magnetic field signals of a solar magnetograph (Северный А.Б. Калибровка сигналов магнитного поля солнечного магнитографа) // 1967. – Известия КрАО. – Т. 36. – С. 22–50.
20. Shpitalnaya A.A., Vyalsin G.F. About magnetic fields in prominences (Шпитальная А.А., Вяльшин Г.Ф. О магнитных полях в протуберанцах) // Солнечные данные. – 1970, № 4. – С. 100–107.
21. Skomorovsky V.I. Mosaic for magnetic field measurements (Скоморовский В.И. Мозаика для измерения магнитных полей) // В сб.: Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца, Вып. 26. – М.: Наука. – 1974. – С. 220–221.
22. Solanki S.K. Sunspots: An overview // *Astronomy and Astrophysics Review*. – 2003. – Vol. 11. – P. 153–286.
23. Solov'ev, A. A.; Lozitskii, V. G. Force-free model of fine-structure magnetic elements // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* – 1986. – Vol. 2. – P. 80–84.
24. Stenflo J.O. Magnetic-field structure of the photospheric network // *Solar Physics*. – 1973. – Vol. 32, No 1. – P. 41–63.
25. Unno W. Line formation of a normal Zeeman triplet // *Publ. of Astron. Society of Japan*. – 1956. – Vol. 8. P. 108–125.

Надійшло до редколегії 30.06.2021

В. Лоцицкий, д-р физ.-мат. наук

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

## МАГНИТОГРАФИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ КИЕВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ ТАРАСА ШЕВЧЕНКО В 1975–1980 гг.

В 1975 г. в Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко был установлен и начал действовать магнитограф полного вектора конструкции СибИЗМИР, и это инициировало создание в обсерватории нового перспективного научного направления – измерение солнечных магнитных полей как магнитографическим, так и спектрально-поляризационным методом. В этой статье приведен краткий обзор хронологии событий в первые 5 лет существования нового направления, а также важнейших научных результатов в этот период. В частности, тогда были получены новые данные о существовании магнитных полей напряженностью  $\approx 10$  кГс в активных областях на Солнце, о дискретности напряженностей в субтелескопических структурах с очень сильными полями, а также данные о существенном подавлении в них турбулентных движений. Соответствующие выводы были подтверждены и детализированы новыми исследованиями в последующие годы.

Ключевые слова: Солнце, солнечная активность, спектральные исследования, эффект Зеемана, магнитные поля, солнечный магнитограф.

V. Lozitsky, Dr Hab.

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

## MAGNETOGRAPHIC AND SPECTRAL INVESTIGATIONS OF SOLAR MAGNETIC FIELDS IN ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV IN 1975–1980

In 1975, at the Astronomical Observatory of the Taras Shevchenko National University of Kyiv, a magnetograph of the full vector of the SIBIZMIR design was installed and began to operate, and this initiated the creation of a new promising scientific direction at the observatory - the measurement of solar magnetic fields by both magnetographic and spectral-polarization methods. This article provides a brief chronology of the events in the first 5 years of the existence of the new direction, as well as the most important scientific results during this period. Based on the experience of observations obtained at the Kyiv observatory, it was concluded that this magnetograph in the Kyiv's astroclimate can not provide such scientifically valuable data as those magnetographs used in other observatories far outside large cities. In particular, although in Kyiv the sensitivity of measurements in the longitudinal magnetic field channel was quite high – about 5 G in the longitudinal field channel and 75 G in the transverse field channel, "noise" in the radial velocity channel reached 0.3 km/sec, which is about an order of magnitude higher than in the Crimea magnetograph. Another reason for the limited use of the magnetograph in the Kyiv observatory was that in the late 1970s significant problems with the calibration of magnetographic measurements became apparent, as a result of which such measurements in the areas of sunspots could have errors of 200–300%. However, in parallel with magnetographic research, spectral-polarization studies were also developed, and they allowed to obtain the most important results. In particular, the new data were obtained on the existence of magnetic fields with a strength of  $\approx 10$  kG in active regions on the Sun, on the discreteness of the strengths in subtelescopic structures with very strong fields, as well as data on the significant suppression of turbulent motions in them. The corresponding conclusions were confirmed and detailed by new research in the following years.

Key words: Sun, solar activity, spectral investigations, the Zeeman effect, magnetic fields, solar magnetograph.

УДК 52-44; 521.933

S. Parnovsky, Dr Hab., Prof.

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

## LOSS OF ANGULAR MOMENTUM WHEN THE PLANET'S ATMOSPHERE LEAKS INTO SPACE

In the case of a rotating planet the well-known Jeans mechanism of atmospheric leakage into space leads to a decrease not only in its mass, but also in the angular momentum. We found a constrain linking these losses. On its basis, it is shown that this mechanism could not significantly affect the duration of the Earth's day and its accounting cannot smooth out the problems associated with the theory of the formation of the Moon during the so-called Giant impact, i.e. collision of the protoplanet Theia with the Earth.

Key words: angular momentum, atmospheric leakage, Giant impact.

**Introduction.** Accurate measurements have shown that the angular velocity of the Earth's rotation is decreasing. The length of a day increases by 23  $\mu$ s per year. This is due to the transfer of angular momentum from the Earth to the Moon, which for this reason is slowly moving away from the Earth. The distance to the Moon averaged over the period of revolution increases by 38 mm per year. These phenomena were predicted at the end of the 19th century by the English astronomer Sir George Howard Darwin [1]. He also pointed out the reason: the moment of forces arising from the gravitational interaction of tidal waves on the surface of the Earth with the Moon. The fact that in the distant past days were shorter was confirmed by paleontologists when studying fossil corals.