

Член-кореспондент НАН України В. І. Лялько

## Оцінка впливу природно-антропогенних змін потоків $\text{CO}_2$ у системі рослинність — атмосфера на формування парникового ефекту Землі

*The analysis of the current approaches to the “Earth’s greenhouse effect” prediction is performed. A new methodology has been proposed to estimate the “greenhouse effect” and its change on the basis of the ground experimental  $\text{CO}_2$  flow measurements and the satellite data analysis. The many-year variations of the areas occupied by different vegetation species with different photosynthetic activity features are considered. The  $\text{CO}_2$  flow values are determined and are converted into the “greenhouse” temperature analogs which can be used in the models of energy-mass exchange in the geospheres of the Earth for the computer forecasting of global and regional changes of the climate.*

Як свідчать численні публікації [1–7], зафіксована тенденція глобального підвищення середньорічної температури повітря, що становила за минуле століття близько  $0,6^\circ\text{C}$ , обумовлена, за висновками фахівців-кліматологів, головним чином, збільшенням вмісту вуглекислого газу в земній атмосфері. Про такі тенденції та наслідки кругообігу вуглецю в природі в свій час вказував В. І. Вернадський [8].

**Постановка задачі.** Які основні джерела та процеси формування надмірної кількості  $\text{CO}_2$  в атмосфері призводять парниковий ефект, тобто створення молекулами  $\text{CO}_2$  своєрідного “теплого бар’єру”, який заважає тепловому випромінюванню Землі виходити у космічний простір?

Такі джерела можна поділити на два типи: 1) антропогенні, які пов’язані з виділенням  $\text{CO}_2$  при спалюванні всіх видів органічного палива (вугілля, нафти, газу, деревини, торфу тощо); 2) природно-антропогенні, які пов’язані зі зміною інтенсивності процесів фотосинтезу в рослинах та зумовленого ним споживання вуглекислого газу з атмосфери, що відбуваються при змінах у часі площ та видового складу рослинного покриву (в першу чергу, тропічних та бореальних лісів).

Якщо ефект надходження  $\text{CO}_2$  до атмосфери за рахунок спалювання органічного палива дослідниками обрахований кількісно та становить близько  $6 \cdot 10^9$  т/рік [6], то аналогічний ефект від впливу природно-антропогенних факторів, пов’язаних зі змінами у часі площ, видового складу та фізіологічних особливостей рослинного покриву Землі, ще не одержав подібних кількісних оцінок.

**Методологія.** Для оперативного й економічного розв’язання вказаної задачі на сучасному науковому рівні повинно бути обов’язковим залучення матеріалів багатоспектральних супутникових зйомок земної поверхні, виконаних у різні роки спостережень.

Комп’ютерна тематична інтерпретація одержаних матеріалів за допомогою створених в нашому Центрі програм [9] дозволяє картографувати зміни по площі та в часі різних рослинних угруповань (особливо, тропічних та бореальних лісів як головних відповідальних за формування джерел та стоків  $\text{CO}_2$  у системі рослинність — атмосфера).

Однак для того щоб відслідкувати потоки  $\text{CO}_2$  у вказаній системі, необхідно мати експериментальні визначення цих потоків для різних видів рослинності в різних ландшафт-



Рис. 1. Баланс потоків CO<sub>2</sub> залежно від виду рослинності та її географічного розміщення

но-кліматичних умовах як у добовому, так і у річному розрізі. Подібні роботи як наземні, так і з використанням космічних носіїв, започатковані в рамках Міжнародних програм FLUXNET, EUROFLUX, BEAR та ін. [10].

**Одержані результати.** Обробка одержаних експериментальних матеріалів за потоками CO<sub>2</sub> (понад 8 тисяч визначень по всій Землі) дала змогу побудувати узагальнену діаграму балансу вуглекислого газу в цих потоках (фотосинтез — дихання рослин) у системі рослинність — атмосфера залежно від виду основної рослинності та її географічного розміщення (рис. 1) [4, 10–12].

Однак наведені оцінки мають оглядовий, глобальний характер. Для більш точного визначення змін площ і видів рослинності, що забезпечують відмінність у величині та напрямках потоків CO<sub>2</sub> у системі рослинність — атмосфера, необхідно залучення та порівняння інтерпретованих космоснімків конкретних територій за певний період часу (бажано кілька десятків років). Такі роботи були виконані та продовжують виконуватися в нашому Науковому центрі аерокосмічних досліджень Землі спільно з Міжнародним інститутом прикладного системного аналізу (IIASA, Австрія), починаючи з 2001 р. [4, 8, 9].

Враховуючи, що зараз бореальні ліси Євразії вважаються головними “легенями планети” [6, 13], об’єктом досліджень були вибрані відповідні полігони в межах Центрального Сибіру (“Усть-Ілімський” та “Большое” — Іркутська область та Красноярський край відповідно) [9].

Для проведення досліджень в межах полігону “Усть-Ілімський” використовувались знімки з КА Landsat MSS (07.09.1977 р.) і знімок КА Landsat-7 (05.07.2000 р.), а в межах полігону “Большое” — знімок КА Landsat MSS (21.06.1977 р.) і знімок Landsat-7 (22.06.2000 р.). Таким чином, в обох випадках розглядаються зміни рослинного покриву протягом 23 років.

Обробку знімків виконували за допомогою програмного продукту ERDAS Imagine методикою, наведеною в [9].

Результати тематичної інтерпретації знімків свідчать про зменшення площ хвойних лісів та збільшення лісових площ з перевагою листяних порід (табл. 1). Це явище зумовлене

значними вирубками хвойних лісів та поновленням лісу за рахунок листяних різновидів на місцях вирубок, пожеж, заболочувань.

Враховуючи, що фотосинтетична потреба в  $\text{CO}_2$  у листяних деревах менша, ніж у хвойних [2–4], це, загалом, призводить до зменшення абсорбції вуглекислого газу рослинами з атмосфери, а отже, вказаний процес працює на зростання парникового ефекту.

Виконані японськими та російськими дослідниками наземні експериментальні роботи по вивченню в Сибіру потоків  $\text{CO}_2$  у системі рослинність — атмосфера, які абсорбуються або виділяються рослинністю, привели до несподіваних результатів [3]. Виявилося, що протягом періоду вегетації рослин (травень — вересень) у тих місцях, де первинні хвойні ліси заміщені листяними лісами та болотно-тундровою рослинністю, зазначено перевищення потоків  $\text{CO}_2$  до атмосфери над його поглинанням рослинами до величин порядку  $+184 \text{ г} \cdot \text{С} / \text{м}^2$  (С — вуглець). Цей феномен підтверджує, що в бореальних лісах Євразії існують механізми поповнення атмосфери парниковими газами (ще й  $\text{CO}_2$  та  $\text{CH}_4$  — на ділянках танення вічної мерзлоти та при лісових пожежах).

Узагальнені дані про кругообіг вуглецю в лісах Росії в 1961–1998 рр. наведені в публікаціях співробітників IIASA [2]. Згідно з цими даними, в бореальних лісах Росії протягом майже 40-річних спостережень виявлено істотне (в 2,5–3 рази) зменшення поглинання лісами  $\text{CO}_2$ , що важко пояснити лише скороченням площі та біомаси (NPP) цих лісів, оскільки показник NPP зріс за вказаний період на 123%. Можливо, такий феномен викликаний інтенсивним виділенням  $\text{CO}_2$  при розкладі мертвої органіки в лісах, обсяг якої зріс за цей час майже в 1,5 рази.

**Обговорення.** Маючи згадані вище картографічні матеріали по зміні площі і видів рослинності за певний період часу, отримані, переважно за даними ДЗЗ (бажано з інтервалом у кілька десятків років — для обґрунтування надійності виявлення таких змін), а також балансові показники про потоки  $\text{CO}_2$  у межах площі, що змінилися, і видів рослинності, можна не тільки оцінити сумарні джерела — стоки  $\text{CO}_2$  у системі атмосфера — рослинність на початковий (за спостереженнями) і сучасний періоди часу, а й орієнтовно прогнозувати цей процес на найближчу перспективу (за умови сталості факторів впливу на систему атмосфера — рослинність).

Подібний приблизний розрахунок дозволить не тільки оцінити внесок життєдіяльності рослинності у вміст  $\text{CO}_2$  в атмосфері на цей час (а отже, і внесок у формування зрос-

Таблиця 1. Зміни поширення різних видів рослинних спільнот у межах фрагментів класифікованих знімків на полігоні “Большое”

Виділені рослинні угруповання	Landsat MSS від 21.06.1977 р.		Landsat-7 від 22.06.2000 р.		Зміна площі видів рослинності	
	Площа, км <sup>2</sup>	%	Площа, км <sup>2</sup>	%	Площа, км <sup>2</sup>	%
Хвойні ліси (молоді, до 30 років)	2330	25	1904	20	-426	-5
Хвойні ліси (понад 30 років)	2070	22	1704	18	-366	-4
Листяні ліси (молоді, до 30 років)	875	9	2067	22	+1192	+13
Листяні ліси (понад 30 років)	1183	712	2196	23	+1013	+11
Не лісові землі (вирубки, луки, болота, агрофітоценози, кущі та рідколісся, дороги, населені пункти)	2919	31	1292	14	-1627	-17
Водна поверхня	79,0	1	80	1	+1	0
Хмари, тіні від хмар	—	0	213	2	+213	+2
Інтегральні показники	9456	100	9456	100	0	0

таючої температури атмосфери), але й прогнозувати цей вплив на температуру повітря в майбутньому, у тому числі, з огляду й на сугубо антропогенний фактор, тобто додаючи в розрахунки CO<sub>2</sub>, що надходить в атмосферу внаслідок спалювання всіх видів викопних органічних палив.

Узагальнене уявлення про потоки CO<sub>2</sub> (у 10<sup>9</sup> т/рік) у системі атмосфера — океан — суша і характеристику його середньорічного балансу (бюджету) дають дані, що містяться в табл. 2, які свідчать про щорічне зростання потоку CO<sub>2</sub> в атмосферу (1980–1998 рр.) на 0,04 · 10<sup>9</sup> т/рік [14].

Цікаву оцінку зміни середньорічного запасу вуглецю при різних сценаріях заліснення (збільшення площі лісів) і обезліснення (зменшення лісових площ) наведено в табл. 3.

У наступні роки планується проведення робіт з використанням матеріалів космічних зйомок і визначення потоків CO<sub>2</sub> на всій території бореальних лісів за рядом міжнародних програм [7], які дозволять дати кількісну оцінку впливу зменшення поглинання цими лісами CO<sub>2</sub> на глобальне потепління клімату.

При цьому необхідно буде враховувати такі важливі положення:

**1.** Ліси Землі, які займають площу близько 44 млн км<sup>2</sup> (~ 29% суші), є найбільшими акумуляторами вуглецю, засвоюють з атмосфери в процесі фотосинтезу велику кількість CO<sub>2</sub> з атмосфери (до 300 млрд т/рік — з врахуванням всіх фотосинтезуючих організмів) і, таким чином, сприяють зменшенню в ній головного із газів, відповідальних за створення парникового ефекту на нашій планеті.

**2.** Як показують дослідження вчених США, глобальне підвищення температури призвело до того, що в результаті активізації процесів розкладання, тропічні ліси до кінця ХХ ст. з абсорбентів CO<sub>2</sub> з атмосфери в більшості випадків перетворилися в постачальників цього газу (і метану) в останню [13].

Таблиця 2. Характеристика середньорічного бюджету CO<sub>2</sub> [Watson R. et al., 2000]

№ п.п.	Характеристика	Оцінка, 10 <sup>9</sup> т · C/рік	
		1980–1989 рр.	1990–1998 рр.
1	Емісія CO <sub>2</sub> за рахунок спалювання палив і виробництва цементу	5,5 ± 0,5	6,3 ± 0,6
2	Нагромадження CO <sub>2</sub> в атмосфері	3,3 ± 0,2	3,3 ± 0,2
3	Поглинання океанами	2,0 ± 0,8	2,3 ± 0,8
4	[1 – (2 + 3)]*	0,2 ± 1,0	0,7 ± 1,0
5	Емісія CO <sub>2</sub> за рахунок зміни у використанні земельними ресурсами	1,7 ± 0,8	1,6 ± 0,8
6	[4 + 5]*	1,9 ± 1,3	2,3 ± 1,3

\* Порядкові номери.

Таблиця 3. Оцінка розрахованої зміни середньорічного запасу вуглецю для сценаріїв заліснення/обезліснення [Watson R. et al., 2000]

Регіон	RF	AF швидкість поглинання CO <sub>2</sub> при залісненні, т · C/(га · рік)	TR		FR	
			A	B	A	B
Бореальний	35	0,4–1,2	0,5	0,1	–18	–185
Помірний	60	1,5–4,5	2,1	1,9	–90	–501
Тропічний	120	4–5	13,7	2,6	–1644	–1352

Умовні позначення: А — обезліснення, В — заліснення, RF — зміна середнього запасу С при обезлісненні, т · C/га; AF — середня швидкість поглинання CO<sub>2</sub> при залісненні, т · C/(га · рік); TR — зміна площі (10<sup>6</sup> га/рік) у результаті переходу між відсутністю лісу й лісом; FR — прогноз зміни запасів вуглецю (10<sup>6</sup> т · C/рік) у 2008–2012 рр. у рамках сценарію ФАО.

3. Тому в наш час бореальні ліси й тундри Євразії, які займають близько 16 млн км<sup>2</sup> (~ 36% усіх лісів планети), у глобальному кругообігу вуглецю на Землі взяли на себе основну функцію вилучення CO<sub>2</sub> з атмосфери.

4. Проведені в бореальних лісах експерименти показали, що середня питома абсорбція вуглецю з атмосфери ліською й тундрською рослинністю становить близько 40 т/км<sup>2</sup> у рік.

Таким чином, річне поглинання вуглецю з атмосфери рослинними співтовариствами Північної Євразії може становити 40 т/(км<sup>2</sup> · рік) · 16 млн км<sup>2</sup> = 48 млрд т/рік (або близько 40% від сумарного поглинання CO<sub>2</sub> рослинністю суші).

5. Як було показано вище, в останні роки з'явилися також тенденції змін рослинного покриву, які можуть призвести до збільшення потоків CO<sub>2</sub> в атмосферу. Ці явища відбуваються, разом з виділенням CO<sub>2</sub> і CH<sub>4</sub> на ділянках танення вічної мерзлоти, яке вже почалося в результаті сучасних процесів потепління, і потоками вуглекислого газу й метану (теж "парниковий" газ), які утворюються при лісових пожежах і складають приблизно таку саму величину, як і не абсорбований з атмосфери CO<sub>2</sub>, у результаті зменшення площі лісів і заміни хвойної складової листяно-болотними співтовариствами, зможуть дати внесок у процеси глобального потепління, що порівнюються з аналогічним впливом щорічного антропогенного спалювання на Землі органічного палива (~ 6 млрд т/рік).

Таким чином, сучасне сумарне наповнення атмосфери вуглецем за рахунок природного й антропогенного джерел може становити ~ 12 млрд т/рік. Якщо ця тенденція не зміниться, а середня величина вмісту вуглецю в атмосфері у наш час становить ~ 750 млрд т, то для подвоєння вмісту CO<sub>2</sub> в атмосфері ( $n = 2$ ) буде потрібно близько 50–60 років. За допомогою досить простої залежності (1) можна орієнтовно прогнозувати зміну середньої глобальної температури ( $T$ ), викликану даним феноменом [6]:

$$\Delta T(t) = \frac{\Delta T_n}{\ln 2} \ln \frac{C(t)}{C_0}, \quad (1)$$

де  $t$  — час, роки;  $C_0$  — початкова концентрація CO<sub>2</sub> в атмосфері на момент часу  $t_0$ ;  $C(t)$  — концентрація CO<sub>2</sub> на момент часу  $t$ ;  $\Delta T_n = 0,6$  °C — підвищення глобальної температури за останні сто років ( $\approx$  з 1900 року).

Наприклад, такий орієнтовний прогноз підвищення температури з 2000 р. до 2050 р. може становити ( $n = 2$ ):

$$\Delta T(t_{2050}) = \frac{0,6}{\ln 2} \ln \frac{720}{360} \approx 0,6 \text{ °C}, \quad (2)$$

де  $C(t_{2000}) = 360$  ppm;  $C(t_{2050}) = 720$  ppm.

При проведенні подальших робіт у напрямі вивчення ролі бореальних лісів Євразії в змінах глобального кругообігу вуглецю, що викликають глобальне потепління, необхідно урахувати:

1) кінцевою метою досліджень є максимально достовірне й економічне прогнозування коротких і довгострокових кліматичних змін не тільки в межах досліджуваного регіону, а й з урахуванням їх взаємозв'язків із загальноглобальними кліматичними змінами (зокрема, зі змінами площі і видів рослинного покриву України);

2) тому з метою системного розгляду на кількісній основі всіх взаємозалежних у цій проблемі питань варто розглядати це питання в рамках загальної фізико-математичної моделі глобального клімату Землі, що описує стан біосфери системою нелінійних диференціальних рівнянь енерго- та масообміну з набором змінних у просторі й у часі параметрів

(температура повітря, земної поверхні й води, вологозапаси континентів, річний стік у Світовий океан тощо) [15];

3) для рішення зазначеної модельної системи рівнянь у регіональному або глобальному масштабах необхідно вміти оперативно визначати й відслідковувати параметри, які входять у ці рівняння. Це можливо, якщо гармонійно використовувати в дослідженнях наземні й космічні виміри, комплексуючи детальні традиційні наземні виміри на ділянках, які можуть бути калібрувальнo-завірковими тест-ділянками для дешифрування матеріалів мультиспектральних зйомок з космічних апаратів і подальшого використання відкаліброваних матеріалів космічних зйомок для вивчення значних територій у режимі моніторингу тільки дистанційними методами;

4) внесок кожної держави-учасника в ці дослідження буде складатися із проведення традиційних наземних гідрометеорологічних вимірів і калібрувальнo-завіркових полігонних робіт для тематичної інтерпретації матеріалів космозйомок на своїх територіях, а також з обміну даними й творчою участю в обґрунтуванні розрахункових параметрів для моделей прогнозу кліматичних змін з обліком натурних експериментальних визначень;

5) тільки міжнародне та міждержавне співробітництво може сприяти розв'язанню цієї найважливішої глобальної проблеми, пов'язаної зі зміною клімату. Відомо, що на сьогодні у різних країнах розпочато роботи із прогнозування кліматичних змін. Так, в Інституті обчислювальної математики РАН та в ряді інститутів США проведено масштабні дослідження динаміки клімату. Виконано моделювання динаміки клімату на планеті в ХІХ–ХХІІ ст., що враховує загальну циркуляцію атмосфери й океану [15].

Показано, що наприкінці ХХІІ ст. в порівнянні з нинішнім часом відбуватиметься глобальне потепління більш ніж на 3 °С. Що стосується географічного розподілу зміни температури, то через 200 років максимальне потепління відбудеться в Арктиці. Поблизу Північного полюса в літню пору багатолітні льоди практично зникнуть, і будуть з'являтися тільки взимку. Значно підвищиться температура в помірних широтах всіх континентів Північної півкулі (на 4–6 град), менше потеплішає повітря над океанами й у Південній півкулі (на 2–3 град) [15].

Попередні дослідження, виконані в цьому напрямі відносно України показують, що регіональні тенденції зміни природних умов внаслідок глобального потепління (збільшення суми опадів на півдні території й зменшення в Поліссі, зменшення амплітуди приземної температури тощо) будуть в основному сприятливими для економіки (вироблення продовольства та ін.) України і комфортності життя її населення [1]. На жаль, як показують прогностичні оцінки, цього не можна стверджувати для більшості країн, розташованих південніше нашої країни, де можливі умови створення пустельних кліматичних обстановок [15].

Вказана вище обставина, поряд з несприятливими демографічними тенденціями еволюції населення України, може створити реальну соціально-політичну погрозу існуванню українського етносу в його сучасному вигляді, завдяки суттєвому збільшенню в такій ситуації міграційних потоків населення до України.

Попередні оцінки свідчать про те, що ефект потепління клімату в полярних регіонах може бути у два-три рази сильніше, ніж у тропіках, а зона опустелювання в Європейській частині може досягти південних границь колишнього СРСР. Зокрема, комфортність, що зростає при подібному сценарії кліматичних змін проживання населення в смузі 45–55 град СШ (при можливому погіршенні кліматичних умов північніше й південніше цих границь) може призвести до посилення людських міграційних потоків у зону комфорту та загострен-

ня соціально-економічних відносин між країнами “щасливчиками” і “невдахами”. Тому результатом подібних кліматичних прогнозів повинні бути також і соціоекономічні передбачення, і рекомендації з функціонування національних економік в умовах можливого зниження (або підвищення) агротехнічної продуктивності й інтенсифікації несанкціонованих міждержавних міграційних потоків населення [8].

Згідно з аналізом існуючих підходів до прогнозування парникового ефекту Землі, запропоновано нову методологію оцінки його змін на основі наземних експериментальних визначень потоків CO<sub>2</sub> та зіставлення на підставі аналізу космознімків багаторічних змін площ, зайнятих різними видами рослинності, що характеризується своїми особливостями фотосинтетичної активності. Одержані значення потоків CO<sub>2</sub>, перераховані у відповідні аналоги температур парникового ефекту, можуть бути використані у моделях енергомасообміну в геосферах Землі для комп’ютерного прогнозування сценаріїв глобальних і регіональних кліматичних змін.

Експериментальними дослідженнями доведено, що при збільшенні концентрації вуглекислого газу ріст рослин спочатку збільшується, а потім (при концентрації в 1,5–2 рази більшої в порівнянні із сучасною в атмосфері) рослини починають гнітитися, їхня продуктивність падає. Цю ситуацію варто мати на увазі стосовно до біосфери в цілому. Не виключено, що при значному зростанні вмісту вуглекислого газу в атмосфері продуктивність рослин почне знижуватися. У результаті прискориться зростання вмісту вуглекислого газу в атмосфері, що призведе до ще більшого падіння біопродуктивності. А це зумовлює подальше збільшення його вмісту. Процес “саморозкручується”, а біосфера втрачає стійкість. За модельними розрахунками це може відбутися вже між 2050 і 2100 рр. [5, 6]. Надалі атмосфера Землі може виявитися мало придатною для існування життя в її сучасній формі.

Таким чином, головні глобальні загрози людству пов’язані з антропогенним вилученням продукції природної біоти й зі збільшенням вмісту вуглекислого газу в атмосфері за рахунок спалювання викопного палива, зменшення й погіршення якості лісів. Їхня дієвість залежить від того, наскільки будуть ефективні й масштабні природні й штучні процеси компенсації антропогенних впливів на біосферу, здійснювані людським співтовариством. У розв’язанні цієї проблеми першорядне значення має науковий прогноз глобальних кліматичних змін, здійснюваний шляхом комп’ютерного моделювання енергомасообміну в геосфері Землі з масштабним використанням матеріалів космічних зйомок.

1. Волощук В. М., Бойченко С. Г., Степаненко С. М. та ін. Глобальне потепління і клімат України. – Київ: ВПЦ “Київ. ун-т”, 2002. – 116 с.
2. Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V. Russian forests and fluxes of major greenhouse gases XI IBERA Conf., Krasnoyarsk, – 2002. – [Russia].
3. *Proceeding of the Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999.* – / Ed. by Inoue Gen, Takenaka Akio: 323. – 2002. – (<http://www.grida.no>).
4. Lyalko V. I. Global Foresight of Climate and Socio-Economic Changes: a View from Space: Conf. Abstr. Book. First IAA Intern. Conf. Impact of Space on Society, Budapest, 17–19 March, 2005. – Budapest: IAA, 2005. – P. 31.
5. Тарко А. М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов (математическое моделирование). – Москва: Наука. Сов. энцикл., 2005. – 231 с.
6. Кондратьев К. Я., Крапивин В. Ф. Моделирование глобального круговорота углерода. – Москва: Наука. Сов. энцикл., 2004. – 336 с.
7. IPCC Climate Change 2001. – The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge: Cambr. univ. press; Unit. Kingdom and New York, 2001. – 881 p.
8. Лялько В. И., Харечко О. Г. Вернадский о круговороте веществ и глобальное потепление // *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності.* – 2003. – № 1. – P. 54–58.

9. Лялько В. І., Попов М. О., Федоровський О. Д. та ін. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування. – Київ: Наук. думка, 2006. – 357 с.
10. FLUXNET Data Sets. – www.daac.ornt.gov.net – 2002.
11. Myneni R.B. et al. A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests: Proc. Nat. Acad. Sci. [10.1073/pnas 261555198]. – 11 Dec., 2001. – New York, 2001. – 15 p.
12. Rahman A. F. et al. Modeling CO<sub>2</sub> flux of boreal forests using narrow band indices from AVIRIS imagery. <http://vcsars.calstatela.cdu/boreas/avirisoo/modelling.2001>.
13. SPECTRA. Newslet. of the Carnegie Instit. of Washington. CO<sub>2</sub> Has a Day in Congr. – Spring, 2000. – Winter and Summer 2003. – News Release, 5 April, 2004. – [http // www. carnegieinstitution. org. globalecology](http://www.carnegieinstitution.org/globalecology).
14. Watson R. T., Noble I. R., Bolin B. et al. Land use change, and forestry. – Cambridge: Cambr. univ. press, 2000. – 377 p.
15. Schwartz P., Doung R. An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implication for United States National Security. – Oct., 2003. – Intern. site. – 22 p.

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі  
Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Надійшло до редакції 10.10.2006

УДК 550.831

© 2007

П. А. Миненко

## Экстремальные итерационные методы решения обратной задачи магнитометрии при исследованиях на кристаллическом фундаменте

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Е. Г. Булахом)

*Iterative methods of the solution of the inverse linear and nonlinear problems of magnetometry are developed. Extreme algorithms of the calculation of depths down to the horizontal division borders of blocks with the maximal difference of magnetic properties are used. By practical examples, the opportunities to determine the intensity of the magnetization of rocks are shown. The depths down to the top sides of approximating parallelepipeds of the physical model of a geological environment are calculated.*

Для картирования магнитных и немагнитных горных пород кристаллического фундамента используются методы магнитометрии и гравиметрии [1–5].

Поскольку горные породы фундамента обладают небольшими разбросами плотности (до 10%), то в результате решения обратной задачи гравиметрии получают надежные средние значения плотности для каждого блока аппроксимирующей модели геологической среды [2, 3, 5]. В магнитометрии этот вопрос значительно сложнее. Интенсивность намагничивания в одних и тех же породах изменяется в десятки и сотни раз на небольших расстояниях. Поэтому в наблюдаемом магнитном поле  $Z_{aj}$  присутствуют очень интенсивные помехи, чаще всего, в виде одно- и двухточечных отрицательных и положительных аномалий, приводящие к неустойчивости решения обратной задачи. В связи с этим очень важно