

УДК 631.61 (477.75)

## ЗМІНИ ГЕОХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ У ПРОЦЕСІ СУЧАСНОГО ҐРУНТОУТВОРЕННЯ В КРИМУ

Олена Єрґіна

*Таврійський національний університет ім. В. І. Вернадського,  
просп. Академіка Вернадського, 4, 95007, м. Сімферополь, Україна,  
e-mail: YazcivLena@rambler.ru*

Розраховано та проаналізовано геохімічні показники, які можна використати для вивчення генези й еволюції ґрунтів. Досліджено особливості зміни коефіцієнта елювіювання, геохімічних коефіцієнтів СІW та СІА, коефіцієнтів засоленості різновікових ґрунтів у часі, які сформувались у сучасних умовах ґрунтоутворення на території Гераклійського півострова.

*Ключові слова:* геохімічні коефіцієнти, різновікові ґрунти, літохімічні індекси, коефіцієнти звітрювання.

У вивченні генези й еволюції ґрунтів важливе значення має комплексне використання ґрунтових, а також геологічних і геохімічних методів досліджень. Ці методи дають змогу виявити в ґрунтовій товщі еволюційні закономірності формування її складу та властивостей залежно від геологічних і біокліматичних фаз розвитку території, протягом яких змінювався напрям ґрунтоутворення. Останнім часом під час палеогеографічних реконструкцій природного середовища, геохімічного аналізу сучасних і минулих умов ґрунтоутворення та звітрювання, ідентифікації властивостей ґрунтів, успадкованих від попередніх етапів еволюційного розвитку, почали застосовувати різні геохімічні коефіцієнти – відношення макро- і мікроелементів [2]. Дослідження, доповнені різними петрофізичними і мінералогічними даними, дають змогу виявляти зміни у властивостях різних відкладень, головню для похованих ґрунтів. Ми ж застосовуємо цей досить рідкісний, однак перспективний підхід дослідження процесів розвитку й еволюції ґрунтів для різновікових педосистем Кримського півострова, що сформувалися на денній поверхні за умов сучасної комбінації чинників ґрунтоутворення.

Труднощі з визначенням віку ґрунтів і загальна нестача добре датованих об'єктів є основними обмеженнями в хронологічних дослідженнях [3]. Тому проблемами вивчення геохімічних змін ґрунтів у часі сьогодні займається дуже мало вчених, переважно за кордоном. Наприклад, М. Кеннеді та ін. [10], О. Чедвік та ін. [7], А. Курц та ін. [11], Ган-Лінь Чжан [9] систематично вивчали розвиток ґрунтів на Гавайських островах і на території Китаю і наочно проілюстрували хімічні й геохімічні зміни ґрунтів хронорядів. Дослідження геохімічних коефіцієнтів дають змогу визначати вік ґрунту та швидкість формування окремих його показників. Зокрема, у праці японських учених запропоновано новий метод оцінки темпів звітрювання і ґрунтоутворення на підставі геохімічних моделей порід, ґрунтів і річкових вод на глобальному і регіональному масштабах. Ми побудували модель ґрунтоутворення з використанням

середнього вмісту семи основних елементів (Al, Fe, Ca, K, Mg, Na і Si) у земній корі, ґрунтах і водах річки, відповідно [14].

Основними геохімічними показниками, які використовують для реконструкції умов ґрунтоутворення та звітрювання, є:

*літохімічні індекси:*

-  $CIA = 100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$  – характеризує ступінь звітрювання ґрунтів і порід та їхні мінералогічні особливості [2];

-  $CIW = (Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O + TiO_2) / Al_2O_3$  – відображає ступінь зрілості тонкої алюмосілікокластики [2];

*коефіцієнти звітрювання:*

-  $Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O + MgO)$  – відношення  $Al_2O_3$  (глиниста складова) до основних катіонів, що виносяться в ґрунтові розчини [12];

- Rb/Sr – запропоновано на підставі різниці в стійкості різних мінералів до звітрювання, а саме – слюд і калієвих польових шпатів, з якими в асоціації перебуває Rb, і карбонатів, з якими асоціює Sr [4, 13];

-  $(Fe_2O_3 + MnO) / Al_2O_3$  – характеризує ступінь окислення ґрунтового матеріалу [2];

-  $Na_2O / K_2O$ ,  $(K_2O + Na_2O) / Al_2O_3$ ,  $Na_2O / Al_2O_3$  – характеризує поведінку легкорозчинних солей у профілі ґрунту [4];

-  $TiO_2 / Al_2O_3$  – дає змогу оцінити ступінь однорідності матеріалу [2, 13].

Актуальність проблеми та відсутність аналогічних досліджень в Україні зумовили нашу мету – дослідити поведінку геохімічних коефіцієнтів у часі на прикладі різновікових ґрунтів, що формуються в сучасних умовах ґрунтоутворення на території Гераклійського півострова Криму.

У ході вивчення особливостей ґрунтоутворення в межах Передгірського Криму ми дослідили різновікові ґрунти, що сформувались на території Гераклійського півострова на: насипі артилерійської батареї, руїнах фортеці Чембало, залишках стін Херсонеса та на території клерів (давніх сільськогосподарських наділів) Страбонового Херсонеса, що був на території Маячного півострова.

Найбільше поширені на Гераклійському півострові куєстово-шиблякові місцевості з коричневими ґрунтами. З урахуванням сучасних уточнень ландшафтна структура визначена структурно-денудаційним передгір'ям на неогенових вапняках і мергелях з коричневими гірськими щебенюватими ґрунтами під колючими чагарниковими заростями, ялівцевими лісами та фриганодно-різнотравними степами [1, 6]. Клімат району дуже посушливий, помірно жаркий з дуже м'якою зимою, для нього характерна сума атмосферних опадів 350–475 мм у рік, середня річна температура 10,3–12,0 °С. В умовах горбисто-балочного куєстового рельєфу (на висотах до 400 м над рівнем моря) дубово-ялівцеві, дубово-фісташкові рідколісся і шибляк (грабінник, держидерево, глід та інші ксерофітні види) характеризують західний передгірний варіант субсредземноморського ландшафту [1].

Загальний вміст елементів у ґрунті досліджено за методикою вимірювань масової частки металів і їхніх оксидів у порошкових зразках ґрунтів методом рентгенфлуоресцентного аналізу на приладі “Спектроскан-макс-gv”. Визначено масові частки 18 макро- і мікроелементів для ґрунтів і ґрунтоутворних порід Гераклійського півострова. На основі даних валового вмісту макро- і мікроелементів у досліджуваних ґрунтах ми обчислили значення літохімічних індексів. Дані розрахунків геохімічних коефіцієнтів наведено в таблиці.

## Геохімічні показники різновікових ґрунтів

Об'єкт, ґрунти	Вік, роки	SiO <sub>2</sub> : R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ке	СІА	СІW	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / (CaO + Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O + MgO)	Rb / Sr	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MnO) / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O / K <sub>2</sub> O	(K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O) / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Залишки артилерійської батареї	100	2,54	0,60	17,19	60,08	0,21	0,15	3,15	2,36	2,42	0,49	0,04
Фортеця Чембало	500	3,22	2,76	41,53	21,58	0,71	0,69	5,59	0,75	2,68	0,15	0,05
“Херсонес Таврійський”	1 000	2,84	0,94	22,06	45,63	0,28	0,27	3,87	1,40	2,68	0,32	0,05
Коричневий, Гераклійський п-в	10 000	2,84	3,93	51,53	17,02	1,04	0,67	7,65	1,77	2,53	0,28	0,06
Ґрунтотворна порода, Гераклійський п-в	0	2,61	1,67	35,13	26,30	0,54	1,00	5,50	1,41	1,92	0,18	0,05
Коричневі, мис Айя	10 000	2,67	4,60	60,29	12,05	1,51	0,44	6,23	0,81	3,04	0,14	0,05
Ґрунти клерів	2 000	2,28	0,87	25,29	37,83	0,34	0,40	4,00	2,59	2,07	0,35	0,04
Ґрунти клерів	2 000	3,21	2,58	39,83	22,66	0,66	0,78	5,49	1,98	1,72	0,23	0,06
Ґрунтотворна порода	0	2,62	0,72	19,34	52,35	0,24	0,29	3,38	3,16	2,07	0,49	0,04
Ґрунти клерів	2 000	2,35	0,98	27,00	36,02	0,37	0,41	4,45	2,22	1,48	0,22	0,05
Ґрунтотворна порода	0	3,00	0,77	18,16	57,39	0,22	0,26	3,33	2,13	2,50	0,47	0,05
Ґрунти клерів	2 000	2,72	0,99	23,64	41,80	0,31	0,17	4,19	1,94	2,36	0,35	0,05
Ґрунти клерів	2 000	2,95	2,10	36,44	25,77	0,57	0,32	5,87	1,27	2,07	0,19	0,05
Ґрунти клерів	2 000	3,11	5,99	60,52	13,88	1,51	1,00	7,48	1,25	1,88	0,16	0,06
Коричневі рілля	10 000	2,96	5,42	59,95	13,13	1,47	0,71	7,01	0,76	2,89	0,14	0,05
Глина, м. Херсонес	0	1,53	10,57	87,61	7,17	6,95	2,29	11,95	0,18	2,26	0,02	0,03

Також ми розрахували молярні відношення кремнезему до полоторних оксидів (SiO<sub>2</sub> : R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) і коефіцієнт елювіювання (Ке) (без урахування натрію) в ґрунтах і ґрунтотворних породах, який запропоновано визначати за формулою  $Ke = SiO_2 : (RO + R_2O)$  [5]. Для ґрунтів досліджуваного регіону таке розширення виправдане, оскільки дає змогу діагностувати накопичення не тільки мінералів оксидів заліза й алюмінію в тонкодисперсних гранулометричних фракціях, а й мінералів-солей, які, зокрема, надходять унаслідок аерації з акваторії Чорного моря.

Оскільки в хронорядах з віком зростає вміст Силіцію, то цілком закономірно, що коефіцієнт елювіювання з віком також збільшується від 0,6 до 3,93–5,42. Для ґрунтів хроноряду тривалістю 0–10 000 років зафіксовано лінійну залежність Ке в часі (див. рис. 1). Модель має високі статистичні характеристики: коефіцієнт кореляційного відношення дорівнює 0,88, коефіцієнт достовірності апроксимації – 0,77.

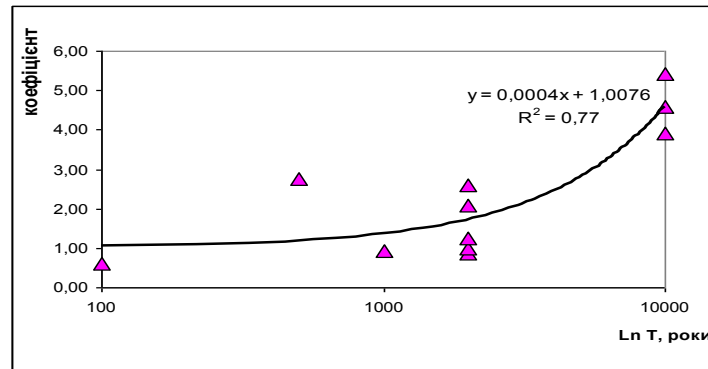


Рис. 1. Зміни коефіцієнта Ке різновікових ґрунтів Кримського півострова впродовж голоцену.

Розрахунок молярного відношення  $\text{SiO}_2 : \text{R}_2\text{O}_3$  дає змогу оцінити втрату зв'язаного кремнезему (десилікацію) і накопичення оксидів алюмінію і заліза. Зі збільшенням вмісту Силіцію з віком збільшується також вміст полуторних оксидів, причому дуже стрімкими темпами, тому й відношення  $\text{SiO}_2 : \text{R}_2\text{O}_3$  змінюється від 2,54 до 3,11 і стабілізується на рівні 2,67–2,96 у повнопрофільних ґрунтах. Для різновікових ґрунтів Кримського півострова ми не виявили чіткої залежності зміни відношення  $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$  в часі, на відміну від закономірностей зміни коефіцієнта елювіювання – Ке.

Висловлені припущення про особливості генези ґрунтів, накопичення і трансформації вихідного матеріалу в процесі ґрунтоутворення підтверджені змінами значень літохімічного індексу СІА, оскільки він відповідає різному ступеню збереження слідів давнього ґрунтоутворення і звітрювання. У незвітрилих породах значення СІА, зазвичай, низькі, а в сильно звітрилих досягають 100 [2].

У різновікових ґрунтах коефіцієнт СІА природно маркуватиме інтенсивність процесів ґрунтоутворення, тому логічно припустити, що зі збільшенням віку ґрунту цей коефіцієнт збільшуватиметься. Наприклад, у ґрунтах 100-річного віку значення СІА дорівнює 17,2; з віком воно збільшується – у 500-літніх ґрунтах досягає 41,53, а в ґрунтах 2000-річного віку – 60,52 (дуже близько до значень зональних ґрунтів 59,95), що свідчить про слабкий прояв у них процесів ґрунтоутворення і звітрювання. Аналогічно в досліджуваних ґрунтах змінюється і літохімічний індекс СІW, який для зручності візуального відображення і формалізованого вираження розраховували в авторській редакції:

$$\text{CIW} = ((\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3) \times 10 \quad (1)$$

Зменшення його значень є ознакою збільшення ступеня зрілості тонкої алюмосилікокластики, кількості власне глинистих мінералів порівняно з ґрунтоутворними породами, у яких висока частка неглинистих силікатних сполук, що мають СІW понад 10 [2]. У нашому випадку значення СІW ґрунтоутворних порід змінюється від 7,2 до 26,3, у ґрунтах 100-річного віку його значення збільшується до 60,1; у тисячолітніх ґрунтах – до 45,6, у віці 2000 років – у діапазоні від 37,1 до 15,43, у зональних аналогах – 13,1–17,0.

Індекси CIW і CIA ілюструють відносні втрати кальцію, калію і натрію. У дослідженні [8] зазначено, що коефіцієнти CIA і CIW досягли стабільного значення на “ранній стадії” (протягом  $9,0 \times 10^4$  років), це означає, що втрата кальцію, калію і натрію внаслідок ґрунтоутворення у вологому тропічному кліматі може відбутися дуже швидко. Проте автори наголосили, що не виявили залежності зміни CIA і CIW з часом (упродовж десяти мільйонів років), отже, ні CIA, ні CIW не можуть бути показником розвитку ґрунту з часом. Однак індекси CIA та CIW більше підходять для вивчення ранніх стадій звітрювання гірських порід, а не для добре розвинених тропічних ґрунтів [8].

Під час розгляду поведінки розрахованих коефіцієнтів CIA та CIW в часі (на порівняно ранніх стадіях формування ґрунту – протягом голоцену) ми виявили логарифмічні залежності цього процесу. Графічну інтерпретацію зміни в часі названих вище коефіцієнтів показано на рис. 2.

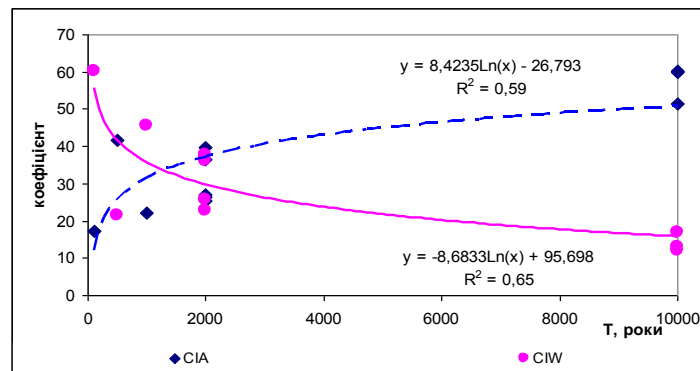


Рис. 2. Зміни коефіцієнтів звітрювання (CIW та CIA) різних ґрунтів протягом голоцену.

У ході дослідження отриманих математичних моделей виявили, що найтісніший зв'язок між характеристиками моделі простежується за умов врахування значень коефіцієнтів для зональних повноголоценових ґрунтів, що пояснює спрямованість, цілісність і безперервність процесу ґрунтоутворення в голоцені та досить тривалі “характерні часи” процесу. Як бачимо з рис. 2, процеси звітрювання на початкових етапах ґрунтоутворення закономірно інтенсифікуються, потім – після 2 000–2 500 років – стабілізуються. Тому ми наголошуємо на можливості використання для характеристики процесів звітрювання та ґрунтоутворення протягом голоцену індексів CIA та CIW.

Коефіцієнт звітрювання  $Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O + MgO)$  поряд із іншими геохімічними індексами свідчить про посилення процесів звітрювання з віком ґрунту. Наприклад, у 100-літніх ґрунтах його значення дорівнює 0,21, у ґрунтах клерів – 0,66, а в зональних ґрунтах – понад 1.

Відношення  $Rb/Sr$  і  $(Fe_2O_3 + MnO) / Al_2O_3$  та  $Al_2O_3 / CaO + Na_2O + K_2O + MgO$  також свідчать, що максимально процеси звітрювання в ґрунтах виявляються через 2 000 років після початку ґрунтоутворення і потім закономірно зменшуються. Апроксимація моделі зміни в часі розрахованих коефіцієнтів звітрювання засвідчила, що процес також має логарифмічну природу (див. рис. 3).

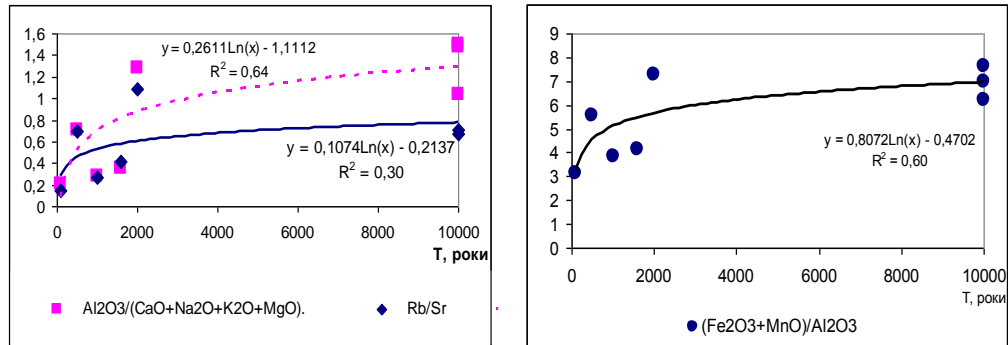


Рис. 3. Зміни коефіцієнтів звітрювання в різновікових ґрунтах.

У процесі гідролітичного звітрювання відбувається руйнування легкорозчинних мінералів унаслідок реакцій гідролізу і подальшого винесення  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ , які є основними катіонами, що виносяться в ґрунтові розчини. У досліджуваних хронорядках простежується тенденція стабілізації або зниження вмісту легкорозчинних оксидів порівняно стабільних елементів, у нашому випадку  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Зміни в часі коефіцієнтів, що характеризують процеси засолення в ґрунтах, відображено на рис. 4.

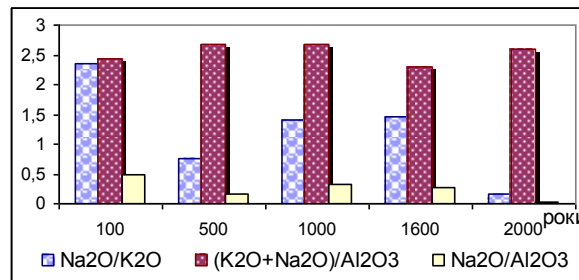


Рис. 4. Зміна в часі коефіцієнтів засолення ґрунту.

Коефіцієнт  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  дає змогу оцінити однорідність ґрунтоутворних порід і визначити наявність привнесеного вторинного матеріалу. Дані таблиці свідчать, що ґрунти здебільшого є ідентичними (і літологічно однорідними), та підтверджують, що ґрунти клерів сформовані на єдиній материнській породі.

Отже, геохімічні коефіцієнти підтверджують суттєву зміну геохімічної обстановки території внаслідок процесів ґрунтоутворення. Геохімічні показники характеризують інтенсивність прояву ґрунтоутворного процесу. Дослідженнями підтверджено, що з часом у ґрунтах інтенсифікуються процеси звітрювання, які загасають після досягнення ґрунтом стану квазірівноваги з навколишнім середовищем. Для характеристики процесів звітрювання і ґрунтоутворення протягом голоцену перспективним є використання індексів CIA та CIW. Вивчення поведінки геохімічних коефіцієнтів у часі дають змогу визначати вік ґрунту і швидкість формування окремих його властивостей з використанням математичних моделей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Багрова Л. А.* Крымское субсредиземноморье / Л. А. Багрова, В. А. Боков, Л. Я. Гаркуша, Н. А. Драган // Экосистемы Крыма, их оптимизация и охрана [тематич. сб. научн. тр.]. – Симферополь, 2003. – С. 95–105.
2. *Елизарова Т. Н.* Современные и реликтовые свойства лесостепных ландшафтов Западной Сибири / Т. Н. Елизарова, Л. Ю. Дитц, А. Н. Сысо [и др.] // Сибир. экол. журн. – 2005. – № 5. – С. 871–887.
3. *Єрґіна О. І.* Ґрунтово-хронологічні дослідження в Криму / О. І. Єрґіна // Фізична географія та геоморфологія. – 2005. – Вип. 49. – С. 206–212.
4. *Калинин П. И.* Геохимические характеристики погребенных голоценовых почв степей Приволжской возвышенности / П. И. Калинин, А. О. Алексеев // Вестник ВГУ. Сер. география, геоэкология. – 2008. – № 1. – С. 9–15.
5. *Кирильчук А. А.* Хімія ґрунтів. Основи теорії і практикум : навч. посібник / А. А. Кирильчук, О. С. Бонішко. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2011. – 354 с.
6. *Современные ландшафты Крыма и сопредельных территорий : монография* // [науч. ред. Е. А. Позаченюк]. – Симферополь : Бизнес-Информ, 2009. – 672 с.
7. *Chadwick O. A.* Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development / O. A. Chadwick, L. A. Derry, P. M. Vitousek [et al.] // Nature. – 1999. – Vol. 397. – P. 491–497.
8. *Gallet S.* Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications / S. Gallet, J. Borming, T. Masayuki // Chemical Geology. – 1996. – Vol. 133. – P. 67–88.
9. *Gan-Lin Zhang.* Geochemical features of a soil chronosequence developed on basalt in Hainan Island, China // Gan-Lin Zhang, Ji-Hua Pan, Cheng-Min Huang, Zi-Tong Gong // Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. – 2007. – Vol. 24. – N 2. – P. 261–269.
10. *Kennedy M. J.* Changing sources of base cations during ecosystem development, Hawaiian Islands / M. J. Kennedy, O. A. Chadwick, P. M. Vitousek [et al.] // Geology. – 1998. – Vol. 26. – P. 1015–1018.
11. *Kurtz A. C.* Refractory element mobility in volcanic soils / A. C. Kurtz, L. A. Derry, O. A. Chadwick, M. J. Alfano // Geology. – 2000. – N 28. – P. 683–686.
12. *Rabenhorst M. C.* The chrono-continuum: An approach to modeling pedogenesis in marsh soils along transgressive coastlines / M. C. Rabenhorst // Soil Science. – 1997. – N 162. – P. 2–9.
13. *Retallack G. J.* Soils and Global Change in the Carbon Cycle over Geological Time / G. J. Retallack // Treatise On Geochemistry. – 2003. – P. 581–605.
14. *Toshiyuki W.* The rate of weathering and soil formation / Wakatsuki Toshiyuki, Rasyidin Azwar // Geoderma. – 1992. – Vol. 52. – Is. 3–4. – P. 251–263.

Стаття: надійшла до редакції 01.03.2013  
доопрацьована 03.04.2013  
прийнята до друку 17.06.2013

## **CHANGES IN GEOCHEMICAL INDICATORS OF MODERN SOIL FORMATION IN CRIMEA**

**Olena Yergina**

*Taurida National V. I. Vernadsky University,  
Academician Vernadsky Ave., 4, UA – 95007 Simferopol, Ukraine,  
e-mail: YazcivLena@ramber.ru*

In the article calculated and analyzed geochemical indicators that can be used to study the genesis and evolution of soils. The features of the changes in the coefficient eluviation, geochemical factors CIW and CIA, the coefficients of soil salinity of different ages in time, which were formed in the present conditions in Heracleian Peninsula, are studied.

*Key words:* geochemical factors, chronosequence, lithochemical indices, the coefficients of weathering.

## **ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ СОВРЕМЕННОГО ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ В КРЫМУ**

**Елена Ергина**

*Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского,  
просп. Академика Вернадского, 4, 95007, г. Симферополь, Украина,  
e-mail: YazcivLena@rambler.ru*

Рассчитано и проанализировано геохимические показатели, которые можно использовать для изучения генезиса и эволюции почв. Исследовано особенности изменения коэффициента элювиирования, геохимических коэффициентов CIW и CIA, коэффициентов засоленности разновозрастных почв во времени, которые сформировались в современных условиях почвообразования на территории Гераклейского полуострова.

*Ключевые слова:* геохимические коэффициенты, разновозрастные почвы, литохимические индексы, коэффициенты выветривания.