

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 004.942:553.044

М.Г. Лустюк¹, д-р тех. наук, доц.,
В.М. Дякон¹, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
В.П. Рачковський², канд. тех. наук

1 – Приватний вищий навчальний заклад „Європейський університет“, м. Рівне, Україна
2 – Державний вищий навчальний заклад „Національний університет водного господарства та природокористування“ м. Рівне, Україна, e-mail: it-eufimb@rambler.ru

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЗАПАСІВ БУРШТИНОВИХ РОЗСИПІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ БЕЗПЕРЕРВНОГО КРАЙГІНГУ

М.Н. Lustyuk¹, Dr. Sci. (Tech.), Associate Prof.,
V.M. Dyakon¹, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Prof.,
V.P. Rachkovsky², Cand. Sci. (Tech.)

1 – Private Higher Educational Institution “European University”, Rivne, Ukraine
2 – National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne, Ukraine, e-mail: it-eufimb@rambler.ru

A MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATION OF AMBER PLACER RESERVES USING THE CONTINUOUS KRIGING METHOD

Мета. Розвинути теорію оцінки бурштинових розсіпів, в основу якої покладена можливість методу безперервного крайгінгу, що дозволяє переоцінити запаси бурштину в напрямі їх збільшення.

Методика. Даний метод полягає в тому, що вмісту кожної проби приписується така маса, за якої забезпечується мінімальна дисперсія оцінки середнього вмісту. Визначення маси проб здійснюється методами геостатистики з урахуванням геометричних форм, розмірів і взаємного розміщення проб та оцінюваного блоку. У загальному випадку, чим більше віддалена проба від центру блоку, тим менша приписується їй вага.

Результати. Оцінка запасів методом безперервного крайгінгу запропонована вперше на основі промислового впровадження комплексу механо-гідралічного опробування на Клесівському родовищі бурштину Рівненської області.

Наукова новизна. Розглянута математична модель безперервного крайгінгу дозволяє отримати оцінку середніх вмістів у блоках, розвіданих системами виїмкових камер, пройдених методом механо-гідралічного видобутку, шурфів чи свердловин великого діаметру (розвідувальних виробок), а також уточнює оцінки середньоблокових вмістів корисних компонентів.

Практична значимість. Головне практичне значення крайгінгу полягає в можливості виключення систематичних похибок значень оцінки середніх вмістів у багатих блоках, що тісно пов'язані з проблемою ураганних проб, яка часто виникає при розвідці бурштинових розсіпів Рівненської області.

Ключові слова: блокування запасів, ураганні проби, коефіцієнт крайгінгу, конформне відображення, інтерполяція, математичне моделювання

Постановка проблеми. Кількісна оцінка корисних компонентів за розвіданими перерізами визначається за результатами аналізу проб бурштинових розсіпів. При розповсюдженні корисних компонентів, визначених за розвідувальними перерізами, виникають похибки їх оцінок. Похибки лінійної інтерполяції виникають через те, що просторова мінливість вмістів наслідок більш складних законів, що виникають у результаті невідповідності середніх вмістів корисного компонента в об'ємах проб їх середнім вмістам в об'ємах оцінюваних блоків.

Як правило, проби з низькими вмістами корисних компонентів приводять до недооцінки, а проби з високими вмістами корисних компонентів – до переоцінки середніх вмістів в оцінюваних об'ємах надр.

Виділення невирешеної проблеми. Середній вміст бурштину у прямокутній і криволінійній зонах родовища, що тяжіють за вмістом до центральної свердловини та свердловин першого й другого ореолів, встановлюється використанням результатів дискретного крайгінга, а пошук найкращої оцінки вмісту бурштину у блоці досягається механо-гідралічним опробуванням із проходженням виїмних камер та подальшим аналізом результатів неперервного крайгінгу.

рвного крайгінгу в замкнутому контурі блоку, як ідеальному екрані, відносно всіх зовнішніх проб із виділенням зон впливу на основі триангуляції Делоне.

Аналіз останніх досліджень. Годунов С.К. і Прокопов Г.П. у своїх працях відзначають, що розв'язок задачі при точковому заданні границі певної області зводять до знаходження функцій і модуля області, що виходить із розв'язку варіаційної задачі про мінімізацію функціоналу на множині внутрішніх вузлів. Однак метод, за твердженням самих авторів, дуже громіздкий, користуватися ним при розрахунках незручно, оскільки він складає значні труднощі.

Виділення невирішеної раніше частини загальної проблеми. Оцінка запасів методом безперервного крайгінга запропонована вперше на основі промислового впровадження комплексу механо-гідралічного опробування на Клесівському родовищі бурштину Рівненської області [1]. З використанням комплексу можливо проходити виїмні камери для відбору проб з необхідною достовірністю й гарантованим представництвом.

Формулювання мети роботи. Горизонтальний переріз родовища на заданій глибині у вигляді багатозв'язної області подано на рис. 1.

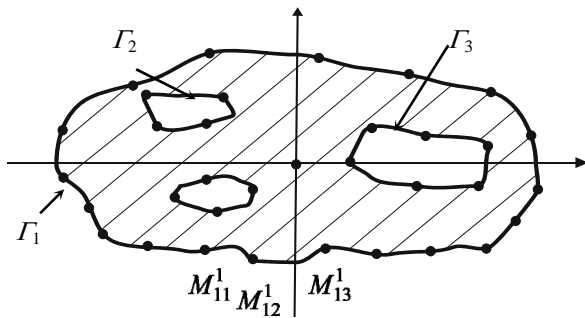


Рис. 1. Область родовища корисних копалин у вигляді багатозв'язної області

Виїмні камери для відбору проб розміщені по контуру $\bigcup_{i=1}^n \Gamma_i$ та всередині багатозв'язної області G в точках M_{ij}^k , де i, j – номери точок, k – номер контура.

У результаті вишукувальних робіт камери (точки контурів $\bigcup_{i=1}^n \Gamma_i$ та всередині області G) для взяття проб позначені $M(x_i, y_i, z_k)$ із відомими значеннями вмісту бурштину ρ_{ij}^k по глибині камери, x_i, y_i, z_k – координати. Потрібно оцінити вміст корисних компонентів у заданому родовищі.

Математичне моделювання задачі оцінки запасів родовища полягає в оцінці запасів бурштину Q в заданому блоці об'єму V

$$Q = \int_V u(x, y, z) dV, \quad (1)$$

де $u(x, y, z)$ – середнє значення вмісту бурштину, що в подальшому назвемо геостатичним потенціалом у

деякій малій області об'єму V з центром у точці $M(x, y, z)$.

Тоді задача оцінки обмеженого такими пробами блоку представляє задачу оцінки геостатистичного потенціалу (деякої функції), якщо її значення відомі на межі заданої області родовища.

Розрізавши заданий блок об'єму V горизонтальними паралельними площинами, що проходять на відстані Δz одна від одної, зведемо дану задачу до серії задач Діріхле для рівняння Лапласа (для кожної площини)

$$\begin{cases} \Delta U^k(x, y, z_*) = 0 \\ U/\Gamma = U_0^k(x, y, z_*), \quad k = \overline{1, n} \end{cases}, \quad (2)$$

де z_* – деяке фіксоване значення (параметр); k – номер шару по глибині блоку. Значення U_0^k апроксимується на основі значень у пробах з виїмних камер.

У випадку канонічних областей розв'язок (2) знаходиться аналітично, а задача неперервного крайгінгу розв'язана повністю [2]. Крім того, якщо задана область є прямокутником або близька до нього, то неважко отримати числовий розв'язок задачі (2). Він представляється наступним чином.

Чисельний метод розв'язання задачі будемо проводити на прикладі рівняння Пуассона, оскільки при рівності правої його частини нулю ($f(x, y) \equiv 0$) отримаємо аналогічні результати для рівняння Лапласа.

Нехай у площині xOy задана зв'язна область G , обмежена контуром Γ , і нехай задана неперервна функція $\varphi(x, y)$ на контурі Γ . Потрібно знайти наближений розв'язок $U(x, y)$ рівняння Пуассона

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = f(x, y); \quad (x, y) \in G, \quad (3)$$

що задовольняє граничним умовам

$$U|_{\Gamma} = U(x, y), \quad (x, y) \in \Gamma. \quad (4)$$

Сформульована задача, як було відмічено вище, називається задачею Діріхле (першою крайовою задачею) для рівняння Пуассона [3].

Нехай область G являє собою для простоти прямокутник. Покриємо його, наприклад, сіткою з кроками (h_1, h_2)

$$\begin{cases} 0 \leq x \leq nh \\ 0 \leq y \leq mh \end{cases}. \quad (5)$$

Виберемо п'ятиточковий шаблон „хрест“ або 9-точковий шаблон типу „ящик“ і отримаємо різницеві схеми задачі Діріхле на таких шаблонах. Замінімо частинні похідні в рівнянні (5) їх відповідними різницевиими відношеннями. Тоді диференціальне рівняння (5) в кожному внутрішньому вузлі сітки замі-

няємо системою різницевих рівнянь. Таким чином, отримуємо наступні різницеві схеми

$$\begin{cases} (\lambda U)_{ij} = 0 \\ U_{i0} = U_{i0}^{(0)}; U_{im} = U_{im}^{(0)}; i = \overline{1, n-1}, \\ U_{0j} = U_{0j}^{(0)}; U_{nj} = U_{nj}^{(0)}; j = \overline{1, m-1} \end{cases} \quad (6)$$

де λ – різницевий оператор на прямокутній сітці, що визначений, відповідно, на 5-точковому шаблоні „хрест“ або на 9-точковому шаблоні типу „ящик“. Зокрема, для 5-точкового шаблону ($\lambda U = \lambda_5 U$) маємо

$$\lambda_5 U = \frac{U_{i-1,j} - 2U_{ij} + U_{i+1,j}}{h_1^2} + \frac{U_{i,j-1} - 2U_{ij} + U_{i,j+1}}{h_2^2};$$

а для 9-точкового шаблону ($\lambda U = \lambda_9 U$) отримуємо

$$\begin{aligned} \lambda U = \lambda_9 U = & \frac{1}{6h_1^2 h_2^2} \left[2(5h_2^2 - h_1^2)(U_{i+1,j} + U_{i-1,j}) + \right. \\ & + 2(5h_1^2 - h_2^2)(U_{i,j+1} + U_{i,j-1}) + \\ & \left. + (h_1^2 + h_2^2)(U_{i+1,j+1} + U_{i-1,j+1} + U_{i-1,j-1} + U_{i+1,j-1}) \right] - \\ & - 20(h_1^2 + h_2^2)U_{ij}; \end{aligned} \quad (7)$$

Отримані різницеві схеми мають порядок точності відповідно

$$\begin{aligned} 0(h_1^2 + h_2^2) - \text{для } \lambda_5; \\ 0(h_1^4 + h_2^4) - \text{для } \lambda_9. \end{aligned}$$

Числовий розв'язок (7) знаходиться методом послідовної верхньої релаксації

$$U^{\Lambda(k+1)} = \omega U^{\Lambda(k+1)} + (1-\omega)U^{(k)}, \quad (8)$$

де $U^{(k)}$, $U^{\Lambda(k+1)}$ – вектори k -го та $(k+1)$ -го наближення розв'язку U ; ω – релаксаційний параметр, оптимальне значення якого дорівнює

$$\omega = \omega_{opt} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \rho^2}};$$

$$U^{\Lambda(k+1)} = \frac{1}{2(h_1^2 + h_2^2)} \left[h_2^2 (U_{i-1,j}^{(k+1)} + U_{i+1,j}^{(k)}) + h_1^2 (U_{i,j-1}^{(k+1)} + U_{i,j+1}^{(k)}) \right] \quad (9)$$

для різницевого оператора Лапласа при $\lambda = \lambda_5$ формула методу верхньої релаксації записується у вигляді

$$\begin{aligned} U^{\Lambda(k+1)} = & \frac{1}{20} \left[\frac{2}{h_1^2 + h_2^2} \left((5h_2^2 - h_1^2)(U_{i+1,j}^{(k)} + U_{i-1,j}^{(k+1)}) + \right. \right. \\ & + (5h_1^2 - h_2^2)(U_{i,j+1}^{(k)} + U_{i,j-1}^{(k+1)}) + \\ & \left. \left. + U_{i+1,j+1}^{(k)} + U_{i-1,j+1}^{(k)} + U_{i-1,j-1}^{(k+1)} + U_{i+1,j-1}^{(k+1)} \right) \right] \quad (10) \end{aligned}$$

Спектральні радіуси обчислюються відповідно за формулами

$$\rho = \rho_5 = 1 - \frac{2h_1^2 h_2^2}{h_1^2 + h_2^2} \left(\frac{1}{h_1^2} \sin^2 \frac{\pi}{2n} + \frac{1}{h_2^2} \sin^2 \frac{\pi}{2m} \right); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \rho = \rho_9 = & 1 - \frac{12}{5} \cdot \frac{1}{h_1^2 + h_2^2} \left(h_2^2 \sin^2 \frac{\pi}{2n} + h_1^2 \sin^2 \frac{\pi}{2m} \right) + \\ & + \frac{4}{5} \sin^2 \frac{\pi}{2n} \sin^2 \frac{\pi}{2m}. \end{aligned} \quad (12)$$

У випадку вибору квадратної сітки в параметричному прямокутнику $h_1=h_2=h$ функції (9), (10) спрощуються й матимуть відповідно вигляд

$$U^{\Lambda(k+1)} = \frac{1}{4} \left[\begin{aligned} & (U_{i-1,j}^{(k+1)} + U_{i+1,j}^{(k)}) + \\ & (U_{i,j-1}^{(k+1)} + U_{i,j+1}^{(k)}) \end{aligned} \right]; \quad (13)$$

$$U^{\Lambda(k+1)} = \frac{1}{20} \left[\begin{aligned} & 4(U_{i-1,j}^{(k+1)} + U_{i,j-1}^{(k+1)} + U_{i+1,j}^{(k)} + U_{i,j+1}^{(k)}) + \\ & (U_{i-1,j-1}^{(k+1)} + U_{i+1,j-1}^{(k+1)} + U_{i-1,j+1}^{(k)} + U_{i+1,j+1}^{(k)}) \end{aligned} \right]. \quad (14)$$

Спектральні радіуси

$$\rho = \rho_5 = \frac{1}{2} \left(\cos \frac{\pi}{n} + \cos \frac{\pi}{m} \right);$$

$$\rho = \rho_9 = 1 - \frac{6}{5} \cdot \left(\sin^2 \frac{\pi}{2n} + \sin^2 \frac{\pi}{2m} - \frac{2}{3} \sin^2 \frac{\pi}{2n} \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2m} \right). \quad (15)$$

Для 5-точкового шаблону „хрест“ отримуємо таку систему $(n-1)(m-1)$ різницевих рівнянь із точністю $O(h^2)$

$$\begin{cases} U_{i-1,j} + U_{i+1,j} + U_{i,j-1} + U_{i,j+1} - 4U_{ij} = h^2 f_{ij} \\ i = \overline{1, n-1}, \quad j = \overline{1, m-1} \end{cases} \quad (16)$$

Граничні умови замінюються такими

$$\begin{cases} U_{i0} = U_{i0}; \quad U_{im} = U_{im}; \quad i = \overline{1, n-1} \\ U_{0j} = U_{0j}; \quad U_{nj} = U_{nj}; \quad j = \overline{1, m-1} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} U_{ij}^{(k+1)} = & \frac{\omega}{4} (U_{i-1,j}^{(k+1)} + U_{i+1,j}^{(k)} + U_{i,j-1}^{(k+1)} + U_{i,j+1}^{(k)}) + \\ & + (1-\omega)U_{ij}^{(k)} - \left(\frac{h}{2} \right)^2 f_{ij}; \quad i = \overline{1, n-1}; \quad j = \overline{1, m-1} \end{aligned} \quad (18)$$

У випадку, коли горизонтальний переріз родовища приймає вигляд області криволінійної форми, то для знаходження геостатичного потенціалу в такій області можна скористатись наведеним вище різницевим методом із використанням числових конформних відображень.

В основі цього лежить перетворення вихідної крайової задачі до нових незалежних змінних ξ, η області G_ζ комплексного потенціалу – параметричного прямокутника, та розв’язання перетвореної задачі в ньому. У зв’язку з цим, спочатку потрібно побудувати числове конформне відображення області G_z на параметричний прямокутник, що розглядається окремою задачею

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\partial \eta}{\partial y}; \quad \frac{\partial \xi}{\partial y} = -\frac{\partial \eta}{\partial x}; \quad (x, y) \in G_z; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \xi(x, y)|_{\Gamma_z^3} &= 0; \\ \eta(x, y)|_{\Gamma_z^1} &= 0; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \xi(x, y)|_{\Gamma_z^4} &= a; \\ \eta(x, y)|_{\Gamma_z^2} &= b. \end{aligned} \quad (21)$$

У зв’язку з викладеним вище методом, шукаємо обернене відображення із розв’язку задачі

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = \frac{\partial y}{\partial \eta}; \quad \frac{\partial x}{\partial \eta} = -\frac{\partial y}{\partial \xi}; \quad (\xi, \eta) \in G_y; \quad (22)$$

$$g_i(x(\xi, \eta); y(\xi, \eta)) = 0; \quad (x, y) \in G; \quad i = \overline{1, 4}. \quad (23)$$

Для того, щоб замкнути дану постановку, шукаємо ортогональну різницеву сітку прообразу.

Сітка в області G_z до межі області теж шукається ортогонально з рівняннями зв’язку, до яких входять:

1) умова Коші-Рімана

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = \frac{\partial y}{\partial \eta}; \quad \frac{\partial x}{\partial \eta} = -\frac{\partial y}{\partial \xi},$$

в області ∂G_z та на межі;

2) умови ортогональності ліній сітки області G_z її межах, що не використовують рівняння самої межі

$$\text{grad } \xi \cdot \text{grad } \eta = 0; \quad (24)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial y}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial y}{\partial \eta} = 0; \quad (25)$$

3) умови ортогональності на основі рівняння межі $\text{grad } g_i \cdot \text{grad } \xi = 0$ для $\Gamma_z^i, i = 1, 2$; (26)

$\text{grad } g_i \cdot \text{grad } \eta = 0$ для $\Gamma_z^i, i = 3, 4$ (27)

у розгорнутому вигляді

$$\frac{\partial g_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial \xi} - \frac{\partial g_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial x}{\partial \eta} = 0, \quad \text{для } \Gamma_z^i, i = 1, 2; \quad (28)$$

$$\frac{\partial g_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial y}{\partial \xi} - \frac{\partial g_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial \eta} = 0, \quad \text{для } \Gamma_z^i, i = 3, 4. \quad (29)$$

Оскільки функції $\begin{cases} x = x(\xi, \eta) \\ y = y(\xi, \eta) \end{cases}$ є дійсною й уявною частиною аналітичної функції комплексної змінної $z = z(\zeta)$, то вони є гармонічними функціями, тобто задовольняють рівняння Лапласа. Тому, у розглянутій вище математичній моделі, систему Коші-Рімана замінюємо рівняннями Лапласа

$$\Delta x = 0, \quad \Delta y = 0, \quad (\xi, \eta) \in G_y. \quad (30)$$

Така заміна не зовсім адекватна, однак існування числового конформного відображення забезпечується спеціальною процедурою уточнення модуля області G_z родовища корисних копалин.

Другим способом знаходження геостатичного потенціалу в такій багатозв’язній області родовища є метод скінчених елементів.

Згідно з даним методом, геостатичний потенціал будемо шукати у вигляді

$$\varphi \approx \hat{\varphi} = \psi + \sum_{m=1}^M a_m N_m, \quad (31)$$

де N_m – базисні функції; a_m – невідомі коефіцієнти.

$$\int_{\Omega} W_\ell R_\Omega d\Omega + \int_{\Gamma} W_\ell R_\Gamma d\Gamma = 0. \quad (32)$$

Розбиваючи область Ω на ряд підобластей, що не перекриваються, або елементів Ω^ℓ , і побудови потім кусковоподібної апроксимації φ , тобто окремо на кожній підобласті. Тоді використані у процесі апроксимації базисні функції також можуть бути визначені кусковоподібно із застосуванням різних виразів для різних підобластей Ω^ℓ , з яких складена вся область [3]. У цьому випадку визначені інтеграли, що входять до апроксимуючого рівняння, можуть бути отримані простим підсумовуванням (асамблюванням) їх вкладу по кожній підобласті чи елементу, тобто

$$\int_{\Omega} W_\ell R_\Omega d\Omega = \sum_{\ell=1}^E \int_{\Omega^\ell} W_\ell R_\Omega d\Omega^\ell = 0.$$

Таким чином, підсумовування, що включає Γ^ℓ , здійснюється тільки по тих елементах Ω^ℓ , що безпосередньо прилягають до межі. Якщо підобласті мають порівняно просту форму, базисні функції на цих підобластях визначаються однотипно, то досить просто оперувати вказаним вище чином у випадку областей спадної геометричної форми, які складаються з таких підобластей. Розглянута вище теорія є окремим випадком методу скінчених елементів, коли вся область вважається одним елементом.

Кускове визначення базисних функцій означає, що апроксимуючі функції або їх похідні можуть мати розриви. Такі розриви в похідних вищого порядку допустимі. Якщо базисні функції визначені кусковим чи-

ном, то вигідно поставити їм у відповідність деякий „малий носій“, покладаючи їх рівними 0 скрізь, крім розглядуваного елемента і безпосередньо прилягаючих до них підобластей (базисні функції з фінітними носіями). Це дозволить отримати апроксимуюче рівняння зі смужковими матрицями, що забезпечують МСЕ додаткової переваги [4].

Розроблено інформаційну систему для автоматизованого розбиття багатозв'язних областей на скінченні елементи. Таке скінченноелементне покриття здійснено в результаті автоматичної триангуляції областей.

Якщо задана область покрита системою виїмних камер, то на основі проведеного скінченного елементного покриття багатозв'язної області доцільно виділити так звані зони впливу даних камер на основі так званої триангуляції Делоне. У табл. 1 представлені результати відбору проб з камер виїмання за допомогою комплексу механо-гідралічного опробування. Запаси бурштину на ділянці родовища площею 7000 м² по 28 камерах виїмання встановлені із застосуванням розробленого методу.

Таблиця 1

Результати відбору проб з камер виїмання з використанням КМГО

№ камери виїмання	Розміри блоків, м	Площа блоків, м ²	Потужність торфів, м	Об'єм торфів, м ³	Потужність пісків, м	Об'єм пісків, м ³	Вміст бурштину, г/м ³	Запаси бурштину, кг
1	50x50	2500	3,9	9750	1,2	3000	55,9	168
2	50x50	2500	5,1	12750	1,7	4250	27,4	116
3	50x50	2500	4,1	10250	5,4	13500	35,2	475
4	50x50	2500	3,3	8250	6,5	16250	35,9	583
5	50x50	2500	2,7	6750	6,3	15750	27,4	432
6	50x50	2500	1,2	3000	1,2	3000	189,0	567
7	50x50	2500	4,2	10500	1,2	3000	62,7	188
8	50x50	2500	4,2	10500	0,9	2250	79,9	180
9	50x50	2500	5,7	14250	0,9	2250	62,3	140
10	50x50	2500	6	15000	0,6	1500	38,2	57
11	50x50	2500	4	10000	0,6	1500	55,3	83
12	50x50	2500	3,9	9750	0,6	1500	85,6	128
13	50x50	2500	4,2	10500	0,9	2250	63,5	143
14	50x50	2500	3,9	9750	0,6	1500	78,9	118
15	50x50	2500	2,4	6000	2,1	5250	33,2	174
16	50x50	2500	4,2	10500	0,6	1500	36,8	55
17	50x50	2500	3,3	8250	0,6	1500	22,8	34
18	50x50	2500	5,7	14250	0,9	2250	34,5	78
19	50x50	2500	5,4	13500	0,6	1500	27,9	42
20	50x50	2500	6	15000	0,9	2250	34,7	78
21	50x50	2500	6,3	15750	0,6	1500	47,9	72
22	50x50	2500	5,4	13500	1,5	3750	31,6	119
23	50x50	2500	6	15000	0,9	2250	53,2	120
24	50x50	2500	6,3	15750	0,6	1500	44,6	67
25	50x50	2500	4,2	10500	0,6	1500	47,5	71
26	50x50	2500	5,4	13500	1,5	3750	36,6	137
27	50x50	2500	5,6	14000	2	5000	31,9	160
28	50x50	2500	4,1	10250	4,6	11500	47,3	544

Практикою відбору проб, наступною їх обробкою та випробуваннями встановлені залежності зміни вмісту бурштину у пробах залежно від потужності пісків (рис. 2). Із графіка видно, що бурштин приурочений до підстилаючих порід (плотика). Фізична сутність виявленої залежності обумовлена густиною бурштину Клесівського родовища, що характеризується від'ємною плавучістю[5].

Обробка результатів досліджень дозволила встановити закономірність зміни вмісту бурштину залежно від потужності пісків

$$y = 3,3 \cdot 10^{11} - 3,3 \cdot 10^{11} \exp\left(\frac{1}{X^8}\right) - 6,8 \log(X). \quad (33)$$

З використанням запропонованої закономірності, верхню частину шару пісків з незначним вмістом бурштину доцільно віднести до торфів з наступним здійсненням вскришних робіт традиційними методами. На цій основі верхню й нижню межі шару пісків доцільно розглядати не як геологічні, а як економічні, що приведе до зниження собівартості видобутку бурштину.

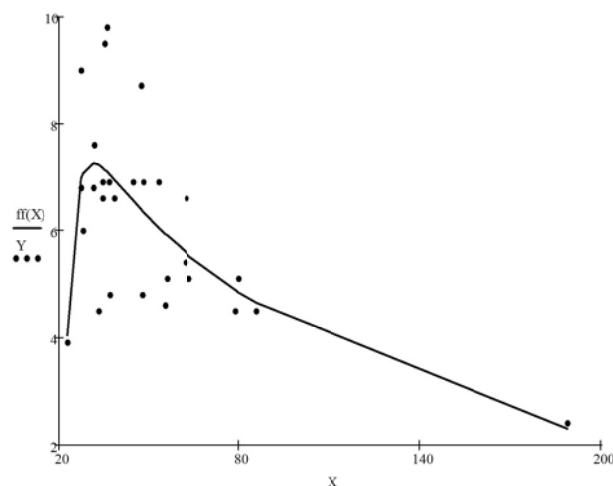


Рис. 2. Зміна вмісту бурштину залежно від потужності пісків

Рис. 3 ілюструє блок-схему підрахунку запасів бурштину на ділянці родовища з використанням запропонованого методу. Запаси бурштину на ділянці родовища (Z_y) можна виразити наступною закономірністю

$$Z_y = \sum_{i=1}^n Z_n, \quad (34)$$

де Z_n – запаси бурштину в обрахованому блоці, кг; n – кількість обрахованих блоків.

Крім того блок-схема дозволяє, з використанням закономірності (34), встановити верхню й нижню межі шару пісків, а також визначити об'єм торфів, що підлягають вскриші, та об'єм пісків, що підлягають промиванню.

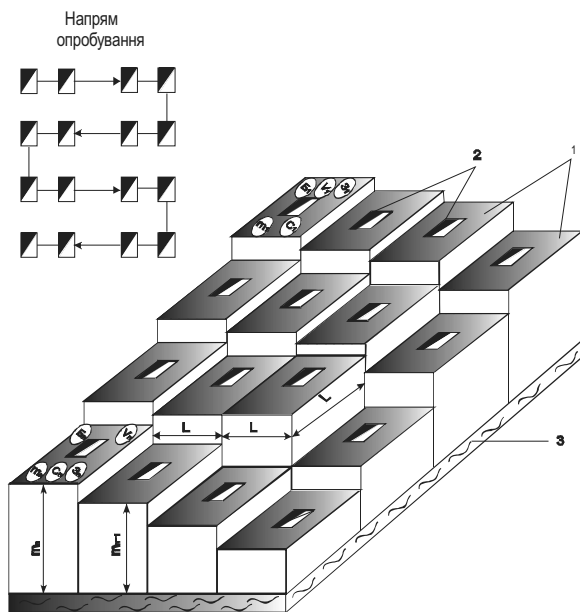


Рис. 3. Блок-схема для підрахунку запасів: B_n – номери обрахованих блоків; L – розміри блоку, м (const); t_n – потужність пісків блоку; C_n – вміст бурштину у блоці g/m^3 ; V_n – об'єм пісків у блоці, m^3 ; Z_n – запаси бурштину у блоці, кг; 1 – обраховані блоки; 2 – камера виїмання; напрям опробування зигзаг

Висновки і перспективи розвитку напрямку.

Запропонований метод оцінки запасів бурштинових розсіпів з використанням можливостей безперервного крайгінгу, що включає пошук найкращої оцінки вмісту бурштину в оцінюваному блоці, розвіданому методом механо-гідралічного опробування шляхом проходження виїмкових камер необхідного перерізу в плані. При цьому замкнутий контур блоку являє собою ідеальний екран відносно всіх зовнішніх проб, який відрізняється тим, що аналіз результатів безперервного крайгінгу дозволив отримати оцінку вмісту бурштину в багатозв'язній області з виділенням зон впливу на основі триангуляції Делоне.

Список літератури / References

1. Лустюк М.Г. Автоматизована система оцінки запасів корисних копалин / М.Г. Лустюк // – Рівне: Вісник РДТУ, 2005. – №1(29). – С. 123–127.

Lustyuk, M.H. (2005), “Automated evaluation of mineral resources reserves”, *Bulletin RDTU*, no.1(29), pp. 123–127.

2. Авдонин В.В. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых / Авдонин В.В., Ручкин Г.В., Шаталин Н.Н. – М.: Академпроект, 2007. – 540с.

Avdolin, V.V., Ruchkin, G.V. and Shatalin, N.N. (2007), *Poiski i razvedka mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh* [Prospecting and Exploration of Mineral Resources], Akadempromekt, Moscow, Russia.

3. Власюк А.П. Математичне і комп'ютерне моделювання оцінки запасів сипучих корисних копалин та

процесу їх видобутку / А.П. Власюк // Abstracts of International Conference “Problems of decision making under uncertainties” (PDMU-2005) – Berdyansk, 2005. – С. 107–109.

Vlasyuk, A.P. (2005), “Mathematical and computer modeling of evaluation of bulk minerals and process of its production”, *Abstracts of International Conference “Problems of decision making under uncertainties” (PDMU-2005)*, Berdyansk, Ukraine, pp. 107–109.

4. Рачковський В.П. Комп'ютерне моделювання оцінки запасів сипучих корисних копалин та процесу їх видобутку / В.П. Рачковський // Зб. наук. праць X Міжнар. конф. – К.: Європ. ун.-т., 2005. – №2. – С. 205–208

Rachkovskiy, V.P. (2005), “Computer simulation of evaluation of bulk minerals reserves and process of their output”, *Proc. of the 10-th Int. Conf., No.2, European University*, Kyiv, Ukraine, pp. 205–208.

5. Минеральные ресурсы Украины. Современные проблемы и факторы развития минерально-сырьевого комплекса Украины / И.М. Гавриленко, Е.А. Кулиш, А.И. Зарицкий, В.С. Мищенко. – К.: Изд-во ГОСКОМГЕОЛОГИИ Украины, 1993. – 122 с.

Gavrilenko I.M., Kulish, Ye.A., Zaritskiy, A.I. and Mishchenko, V.S. (1993), *Mineralnye resursy Ukrainy. Sovremennye problemy i faktory razvitiya mineralno-syryevogo kompleksa Ukrainy* [Mineral Resources of Ukraine. Contemporary Issues and Factors for Development of Mineral Resources Sector of Ukraine], GOSCOMGEOLOGIYA, Kyiv, Ukraine

Цель. Развить теорию оценки янтарных россыпей, в основу которой положена возможность метода непрерывного крайгинга, что позволяет переоценить запасы янтаря в направлении их увеличения.

Методика. Данный метод заключается в том, что содержанию каждой пробы приписывается такая масса, при которой обеспечивается минимальная дисперсия оценки среднего содержания. Определение массы проб осуществляется методами геостатистики с учетом геометрических форм, размеров и взаимного расположения проб и оцениваемого блока. В общем случае, чем больше удалена проба от центра блока, тем меньше приписывается ей вес.

Результаты. Оценка запасов методом непрерывного крайгинга предложена впервые на основе промышленного внедрения комплекса механо-гидравлического опробования на Клесовском месторождении янтаря Ровенской области.

Научная новизна. Рассмотрена математическая модель непрерывного крайгинга, которая позволяет получить оценку средних содержаний янтаря в блоках, разведанных системами выемочных камер, пройденных методом механо-гидравлической добычи, шурфов или скважин большого диаметра (разведочных выработок), а также уточняет оценки среднеблочных содержаний полезных компонентов.

Практическая значимость. Главное практическое значение крайгинга заключается в возможности исключения систематических погрешностей значений оценки средних содержаний в богатых блоках,

которые тесно связаны с проблемой ураганных проб, которая часто возникает при разведке янтарных россыпей Ровенской области.

Ключевые слова: *блокировка запасов, ураганные пробы, коэффициент крайгинга, конформное отображение, интерполяция, математическое моделирование*

Purpose is to develop a theory for assessment of amber placers that is based on the advantages of the continuous kriging method. This allows re-estimating the reserves of amber in order to increase them.

Methodology. This method supposes that a weight providing the minimum variance of the average content is assigned to the content of each sample. The mass of samples is determined by the methods of geostatistics taking into account geometric shape, size and arrangement of samples and the estimated block. In general, the closer the sample is to the center of the block, the bigger weight is assigned to.

Findings. The assessment of reserves by the continuous kriging method has been proposed on the

basis of industrial implementation of the mechanical-hydraulic testing on Klesivske amber deposit in the Rivne region.

Originality. We have considered the mathematical model of continuous kriging that provides the estimation of average amber contents in blocks, prospected by the method of extraction chambers mined out by mechanical and hydraulic mining, prospecting shafts or wells of large diameter, and clarifies the evaluation average mineralization in the block.

Practical value. The main practical importance of kriging consists in the ability to avoid systematic errors in estimates of the average value of content-rich blocks that are closely related to the problem of outstanding samples, which often arises during exploration of amber placers of the Rivne region.

Keywords: *blocking reserves, outstanding samples, kriging ratio, conformal mapping, interpolation, mathematical modeling*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Д.В. Рудаковим. Дата надходження рукопису 16.01.13.