

**ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧНІ І ФІЗИКО-ХІМІЧНІ УМОВИ  
РУДОУТВОРЕННЯ ЯК ЧИННИКИ ПРОМИСЛОВОЇ ЦІННОСТІ  
ЗАЛІЗОРУДНИХ РОДОВИЩ ДОКЕМБРІЮ**

На основе анализа физико-химических реконструкций железнакопления в докембрии и исследований разрезов архейских и протерозойских железисто-кремнистых формаций Украинского щита выявлены доминирующие геолого-генетические факторы, которые влияли на промышленную ценность железорудных месторождений. Охарактеризованы тектонические, геохимические, литологические, метаморфические факторы и их вклад в рудообразование на разных этапах формирования железных руд.

**GEOLOGIC-GENETIC AND PHYSICAL-CHEMICAL CONDITIONS ORE  
FORMATION AS THE FACTORS OF COMMERCIAL VALUE OF  
IRON-ORE FIELDS OF A PRE-CAMBRIAN**

On the basis of analysis of physical-chemical reconstruction iron sedimentation in a Pre-Cambrian and studies of sections archean and proterozoic of banded iron formations of the Ukrainian board the dominant geologic-genetic factors are revealed, which one influenced commercial value of iron-ore fields. The factors and their contribution in ore formation at different stages of forming of iron ores are characterized tectonic, geochemical, lithologic, metamorphic.

Реконструкція структурно-генетичних умов осадконакопичення в докембрію дуже складна. Це обумовлено, з одного боку, значною віковою віддаленістю цього етапу і його своєрідністю, а з іншого – невизначеністю факторів, які б дозволили однозначно встановити пануючі умови осадконакопичення. Проте важливість таких реконструкцій важко переоцінити. Реконструював процеси, що панували на час формування залізорудних родовищ, встановив спрямованість цих процесів в наступні геологічні епохи і виявив закони, яким підкоряється залізнакопичення в часі і просторі можна більш достовірно провести геолого-економічну оцінку родовищ і дати прогноз перспектив їх освоєння, визначити найбільш економічно доцільніші напрямки розробки.

Структурно-генетичні умови залізнакопичення охоплюють досить широке коло проблем, які неможливо висвітлити в достатньому ступені у одній роботі. Тому метою даного розділу дисертаційної роботи є висвітлення тих специфічних рис структурно-геологічних і фізико-хімічних закономірностей докембрійського залізнакопичення, які найбільше впливають на економічну цінність родовищ і дозволяють більш вірогідніше проводити їх геолого-економічну оцінку.

Докембрійські залізорудні родовища містять запаси заліза, які набагато перевищують запаси заліза родовищ більш пізніших геологічних епох (рис. 1).

Гігантські масштаби докембрійського залізнакопичення явились результатом специфічних умов, які не повторювались в наступні геологічні епохи. Фізико-хімічні дослідження [6], довели, що умови одночасного осадження заліза і кремнезему досить обмежені і можуть виконуватись лише при сприятливому збігу багатьох факторів в певних геологічних структурах і в особливі періоди геологічного розвитку.

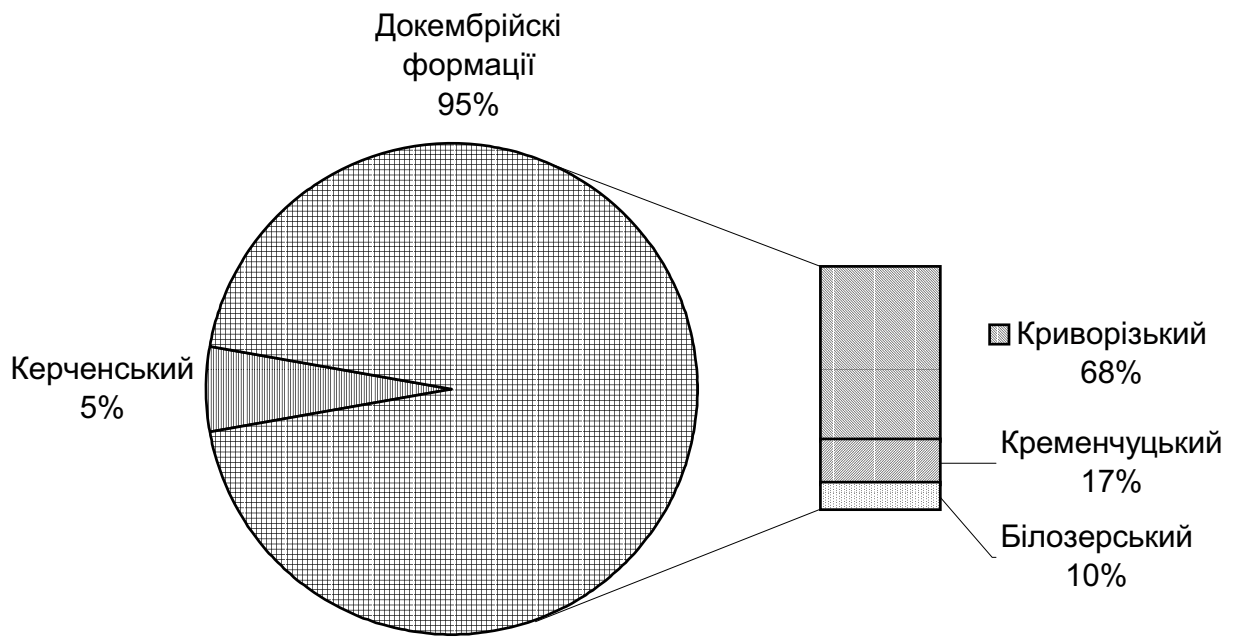


Рис. 1. - Розподіл промислових запасів залізорудних родовищ України

Реконструкції фізико-хімічних умов докебрійського залізнакопичення висвітлені в багатьох роботах як українських, так і закордонних вчених [1-8]. Всі вони пов'язують умови залізнакопичення з формуванням Землі як планети. А.П. Виноградов [3], базуючись на результатах експериментів по плавленню силікатної фази кам'яних метеоритів, пояснює цей процес, як зонне плавлення в результаті якого речовина розділяється на дві фази – легкоплавку і тугоплавку. Перша, подібна за складом до базальту, є прототипом речовини, що утворила земну кору, гідросферу і атмосферу, друга, яка відповідає складу дуніту – утворює верхню мантію. Внаслідок цих процесів диференціації первинної планетарної речовини починає формуватись земна кора. Тривалу стадію ущільнення земної речовини, що завершилась плавленням В.Г. Бондарчук [1] вважає космічною. За нею наступила ранньогіологічна стадія, яка містить еру становлення твердої земної кори, еру первинного вулканізму, і формування ядер материків. Тектонічний режим в цей період В.Е. Хаін [7] характеризує як “евгеосинклінальний”. Цьому періоду властива відсутність високогірного рельєфу і повільні швидкості рухів земної кори, що зумовило порівняно малу глибину ерозійного зрізу і, як наслідок, невелику масу розчинених уламкових продуктів, що поступають в океан.

Архейський етап характеризується початком формування ядер материків. На цьому етапі, за даними [1], посилилась тектоноорогенічна роль вулканізму. Незмінні ядра континентів складали основні породи (базальти, андезити і їх туфи), які пізніше були перетворені в амфіболіти. Ці породи поширені на всіх древніх щитах. Внаслідок руйнування цих порід починають утворюватись первинні пара породи. Вони представлені грауваками, сланцями, залізистими кварцитами, магнетит-амфіболовими сланцями та ін.

Структурні форми цього етапу характеризуються відсутністю лінійних складок. Домінуючими були куполоподібні структури. В плані вони утворювали більш-менш складні овали, або мали амебоподібну форму. Наприкінці архейського етапу товщі порід зазнали інтенсивних складкоутворюючих процесів, процесів регіонального метаморфізму і гранітизації. В цей період сформувалось більше половини всіх гранітів земної кори. Безпосередньо перетворення основних ефузивів в граніти неможливе. Матеріал їх повинен був попередньо звільнитись від надлишків заліза, магнію, кальцію, глинозему, титану і водночас збагатитись кремнеземом, лугами і летучими компонентами. Розділення глинозему і кремнезему і винос двовалентного заліза і лугів відбувається в умовах гумідного вивітрювання основних порід. В докембрійську епоху такі умови були досить поширені. Джерелом луг і летучих компонентів була верхня мантія.

В умовах інтенсивної вулканічної діяльності тверда речовина поступала в переплавку, збагачуючи кремнієм та різноманітними металами нові розплави. Цей процес властивий і для сучасного вулканізму, відрізняючись переважанням дезінтеграції і седиментації над переплавкою речовини. В ранні геологічні епохи, коли безпосередній вплив первинного тепла на земну кору був більш впливовішим, плавлення проходило більш інтенсивніше. Перемішування речовини, яка зазнала екзогенного перетворення і продуктів первинної магми сягало глибини 50-60 км. Цим пояснюється склад гранітоїдного шару земної кори, який є продуктом гіпергенного геологічного перетворення, а не гіпогенним диференціатом.

Період інтенсивної гранітизації (кінець архею) був пов'язаний зміною термального режиму Землі. Істотну роль в цьому процесі відігравала структурна перебудова земної кори, а також завершення процесів очищення вихідного матеріалу основних ефузивів і продуктів їх вивітрювання від надлишків заліза, магнію, кальцію, відокремлення глинозему і титану від кремнезему.

Протерозойський етап характеризується подальшим ростом сіалічної оболонки під континентами. В цей час виникли платформи і геосинклінали. Внаслідок інтенсивного росту сіалю в протерозойський період продовжують розвиватись крупні підняття, які виводили в сферу вивітрювання не тільки основні вулканічні породи і продукти їх метаморфізму, але й і гранітоїди. Відповідно зі зміною складу порід, які руйнувались, змінювався і теригенний матеріал. В цей період, поряд з формуванням каолінових глин і граувак, формуються також аркози, кварцові пісковики і гідролюдисті глини.

Найбільшого поширення в протерозойський період набули джеспілітові, або осадові залізисті формації. Процес накопичення докембрійських залізородних формацій характеризується чітко обмеженим віковим періодом. Він розпочався в архейську епоху, найбільшої інтенсивності набув в ранньому протерозої, значно уповільнився в пізньому протерозої і закінчився в ранньому палеозої. Джерелом заліза і кварцу для формування цих формацій були потужні товщі основних порід, що утворились внаслідок потужного вулканізму. За даними багатьох дослідників [4-6] залізнакопичення відбувалось у водному середовищі. Особлива роль в процесі руйнування основних порід належала складу атмосфе-

ри і гідросфери. Більшість дослідників визнає домінуючу роль окислювальних умов в формуванні залізородних формацій. В ранньому протерозої ще існували відновлювальні умови, проте підкреслював існування особливого режиму кисню. Значні маси кисню витрачались протягом архею та нижнього протерозою на окислення  $\text{CH}_4$  і  $\text{CO}$  атмосфери та аміаку, що розчинений в водах океану. Частина кисню витрачалась на окислення полівалентних металів (Fe, Mn, U та ін.). Перехід цих металів в більш високі валентності істотно зменшував їх розчинність і завдяки цьому сприяв осадженню значних мас заліза з океанічних вод. В цей період вільний кисень не міг накопичуватись в значних кількостях. Це стало можливим лише наприкінці пізнього протерозою, коли абсолютний і відносний вміст кисню в атмосфері почав збільшуватись внаслідок зростання біомаси [6]. Визначальну роль в залізнакопиченні має режим  $\text{CO}_2$  в атмосфері і гідросфері.

За даними [6] сумісне накопичення заліза і кремнезему в умовах морського басейну за рахунок високозалістистих алюмосилікатів імовірно проходило в кислому середовищі ( $\text{pH}=4.5$ ). В сучасних умовах поширення кислих вод дуже обмежене. Проте в докембрійський період внаслідок інтенсивної вулканічної діяльності в гідросфері домінували саме кислі води. Багато дослідників [4] відмічають домінуючу роль вулканізму в формуванні залізисто-кременистих формацій.

Фізико-хімічні умови залізнакопичення в докембрію найбільш детально дослідженні Ю.П. Мельником [6]. На підставі термодинамічного аналізу еволюції древньої атмосфери і гідросфери була виявлена послідовність реакцій окислення при збільшенні  $\text{O}$  і  $\text{CO}_2$ :  $\text{NH}_3 \rightarrow \text{CO}_2$ ;  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C}$ ;  $\text{C} \rightarrow \text{CO}_2$ ;  $\text{S} \rightarrow \text{SO}_4$ ;  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ . На ранніх стадіях розвитку земної кори єдиним джерелом вільного кисню були процеси фотохімічного розкладення водяного пару у верхніх шарах атмосфери при одночасній дисоціації водню. Проте розрахунки доводять, що для окислення первинної атмосфери знадобилось така кількість кисню, яку б могли забезпечити лише біохімічні процеси. Найпростіші рослини (синьо-зелені водорості), залишки яких виявлені навіть у високометаморфізованих породах залізисто-кременистих формацій, імовірно з'явилися ще у ранньому архею з безкисневою атмосферою, яка містила аміак та метан. Таким чином, масове залізнакопичення стало можливим тільки після завершення окислення аміаку, вуглецю та сірки, коли в атмосфері переважала двоокис вуглецю. Вільний кисень в атмосфері з'явився тільки після остаточного окислення сполук закисного заліза в гідросфері і на поверхні суші в інтервалі 1.7-1.2 млрд. років тому. До початку осаджування гідроокислів заліза в первинному океані все більше домінували буферні карбонатні і карбонатно-силікатні рівноваги, що контролюють  $\text{pH}$  і, можливо,  $P_{\text{CO}_2}$  [6]. При осаджуванні кристалічних залізо-магнезійних карбонатів в рівновазі з силікатами величини  $\text{pH}$  знаходились в межах 6.58-7.3, а  $P_{\text{CO}_2}$  в межах 0.003-0.013 ат. Дані про співвідношення стабільних ізотопів кисню, вуглецю і сірки в осадових породах докембрію узгоджуються зі схемою еволюції.

Розвиток вуглекислої земної атмосфери і осадження окисного заліза, імовірно, були безпосередньо пов'язані між собою. Значні колонії фітопланктону розвивались в обмежених дільницях древніх водоймищ, на певній глибині, яка контролювалась товщею води і захищала мікроорганізми від ультрафіолетового випромінювання. Існував також зв'язок з зонами вулканічної діяльності які були постачальниками необхідних компонентів, зокрема кремнезему. Періодичні "спалахи" інтенсивного розвитку фітопланктону в умовах докембрію призводили до окислення  $Fe^{2+}$  до  $Fe^{3+}$  безпосередньо в товщі води і осадженню практично не розчинного гідроокису. Виділення кисню при фотосинтезі супроводжувалось відповідним зростанням біомаси з поглинанням вуглекислого газу  $CO_2$ , що в свою чергу призводило до локального падіння  $P_{CO_2}$  і зростання  $pH$ . В результаті поряд з окислами  $Fe(OH)_3$  відбувалось осаджування карбонатів. Циклічне осадження сполук заліза у порівняно мілководних басейнах на фоні безперервного осадження аморфного кремнезему пояснює природу смугастості і різноманіття текстур, структур і мінеральних асоціацій залізистих кварцитів (рис.2). На осадження кремнезему також впливали коливання температури басейну, що призводило до появи мікроритмів і інтенсивність фумарольної діяльності, наслідком якої явилися макроритми.

Осадконакопичення в докембрію і характер тектонічного режиму детально досліджені в роботах Є.М. Лазько [4, 5]. Він поділяє докембрію на догеосинклінальний етап розвитку і ранньогосинклінальний. Перший етап повністю охоплює термін архейського осадконакопичення. Початок другого етапу співпадає з початком протерозойського осадконакопичення. На межі першого і другого етапів відбувалась суттєва перебудова тектонічного режиму на всій планеті. Підкреслюючи особливий режим осадконакопичення в архею, який більше ніколи не повторювався, Є.М. Лазько виділив специфічні формації архейських комплексів.

Їм властивий високий ступінь метаморфізму, внаслідок чого первинний склад і походження архейських порід досить важко встановлюються. Архейські серії і світи часто охоплюють великі площі більш-менш ізометричних обрисів, що властиво для платформних осадків. Потужності їх досить значні і часто перевищують потужності цілих серій більш пізніх геосинклінальних формацій. Але на відміну від останніх для архейських товщ не властиві різкі градієнти потужностей. Літологічний склад архейських комплексів зазвичай різко змінюється по стратиграфічній вертикалі, проте досить витриманий в латеральних напрямках. На відміну від архею, коли виверження вулканічних продуктів основного складу мали ареальний характер, вже в ранньому протерозою картина різко змінюється. Вулканізм локалізується в межах відносно вузьких і видовжених зон, які пов'язані з виникненням і розвитком глибинних розломів. Залізисто-кременисті осадки набувають максимального розвитку в першій половині ранньогосинклінальної стадії, потім обсяги залізнакопичення досить різко зменшуються і майже повністю зникають на межі протерозою і палеозою.

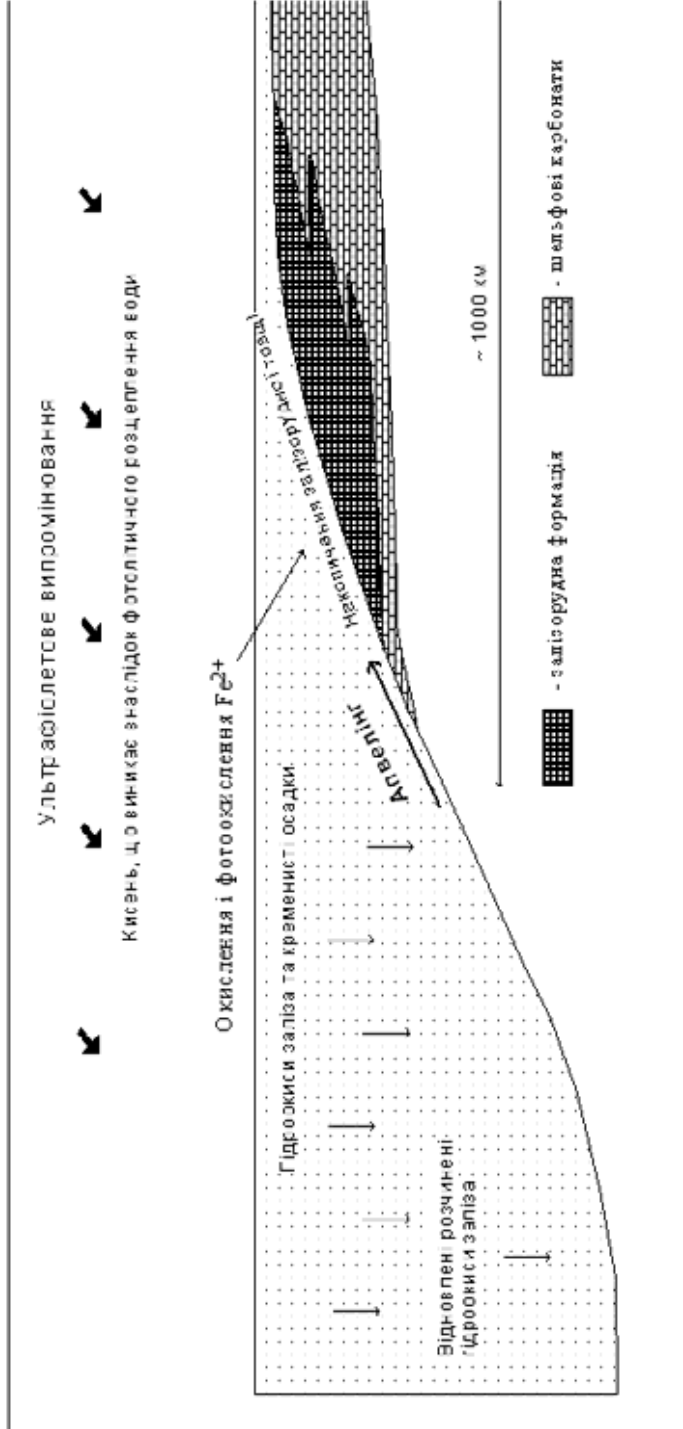


Рис. 2. - Модель залізонакопичення в нижньому протерозою [8]

Таким чином аналіз реконструкцій докембрійського залізнакопичення дозволяє зробити наступні висновки.

1. Залізисті породи почали утворюватись в археї. Важливою генетичною особливістю архейських залізисто-кременистих осадків є тісний зв'язок з вулканітами і їх вулканогенно-ексгалаційна природа при підпорядкованому значенні хемогенно-осадових процесів.

2. Архейські залізисто-кременисті осадки мають невеликі потужності і незначне поширення по площі, що пояснюється порівняно слабким градієнтом тектонічних рухів і фізико-хімічними особливостями атмосфери. Це призвело до формування невеликих за запасами залізорудних родовищ з вмістом заліза переважно 30-40%, розробка яких може бути рентабельною лише за умов просторової наближеності рудних покладів.

3. Залізисті мінерали порід архейських родовищ в порівнянні з протерозойськими характеризуються меншим вмістом шкідливих для металургійної переробки ізоморфних та механічних домішок. До того ж вони мають більш довершені кристалографічні форми і більший гранулометричний склад, внаслідок чого архейські залізисті кварцити характеризуються більш високими технологічними показниками ніж нижньопротерозойські. Незначний вміст шкідливих домішок і майже повна відсутність  $Al_2O_3$ ,  $P_2O_5$  та S в архейських залізистих кварцитах робить їх цінною сировиною для порошкової металургії і процесів прямого відновлення заліза.

4. Найбільш значні обсяги залізистих порід утворились в протерозої. Інтенсивний процес залізнакопичення відбувався завдяки збігу ряду факторів, основними з яких є:

- закладення крупних прогинів, які мали стійку тенденцію до опускання і інтенсифікації процесів зносу продуктів руйнування первинних порід;
- локалізація вулканізму і поствулканічних процесів в межах вузьких зон, які пов'язані з зонами глибинних розломів;
- розвиток живих організмів, в тому числі бактерій, що здатні акумулювати залізо з розчинних сполук;
- збільшення вмісту кисню сприяло переводу заліза в нерозчинний осадок при апвелінгу.

5. Нижньопротерозойські залізисто-кременисті формації містять понад 92% сумарних світових запасів заліза. Родовища в протерозойських залізисто-кременистих формаціях характеризуються великими запасами, здатними забезпечити роботу гірничо-збагачувальних комбінатів на кілька десятків років. Проте використання протерозойських залізистих кварцитів, як сировини для якісної металургії обмежене, підвищеним вмістом в них таких шкідливих домішок, як сірки, миш'яку, фосфору, цинку та ін.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бондарчук В.Г. Очерк тектонического строения территории Украинской ССР// Геол. журн. – Т. 5.- Вып. 3. – С. 27-29.
2. Брандт Р.Т. Генезис джеспилитовых железных руд Австралии/ Труды Междунар. конф. «Геология и гене-

зис докембрийских железисто-кремнистых и марганцевых формаций мира».- Киев: Наукова думка.- 1972.- С. 44-55.

3. Виноградов А.П. Газовый режим Земли// Химия земной коры. – Т.2. – М.: Наука, 1964. – с. 12-22.

4. Железисто-кремнистые формации докембрия Европейской части СССР. Зеленокаменные пояса и роль вулканизма в формировании месторождений/ Е.М. Лазько, А.А. Сиворонов, М.А. Ярошук и др. - Киев: Наук. думка, 1990.- 172 с.

5. Лазько Е.М. Архейские железорудные формации и некоторые особенности их генезиса // Геология рудных месторождений. – 1988. - №2. – С. 9-10.

6. Мельник Ю.П. Физико-химические условия образования докембрийских железистых кварцитов.- Киев: Наук. Думка, 1973.- 287 с.

7. Хаин В.Е. Особенности тектонического развития земной коры в раннем докембрии – действительные и мнимые // Проблемы геологии раннего докембрия. – Л.: Наука, 1977. – С. 5-12.

8. Goodwin A. M. Distribution and origin of Precambrian banded iron-formation. – Rev. Brasil. Geocienc., 1982, v. 12, №1-3, p. 475-462.

**УДК 624.191.24**

**В.Д. Петренко, А.Л. Тютюкин**

## **ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ РАСЧЕТ СТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА С ИНТЕРПРЕТАЦИЕЙ ОКРУЖАЮЩЕГО МАССИВА КАК УПРУГО-ВЯЗКО-ПЛАСТИЧЕСКОГО**

У статті розглядається проблема просторових розрахунків станцій метрополітену з інтерпретацією навколишнього масиву як пружно-в'язко-пластичного. Наведено алгоритм розрахунку пілонної станції, особливістю якого є облік пружних, пластичних і в'язких (реологічних) властивостей масиву. Показано, що при використанні розробленої методики досягається високий рівень адекватності моделі реальним умовам.

## **SPATIAL ACCOUNTS OF UNDERGROUND STATIONS WITH INTERPRETATION OF AN ENVIRONMENTAL MASSIF AS ELASTIC, VISCOUS AND PLASTIC**

In the article is considered the problem of spatial accounts of underground stations with interpretation of an environmental massif as elastic, viscous and plastic. The algorithm of account pylon station is given, which distinctive feature is the account elastic, plastic and viscous (reological) of massif properties. Is shown, that at use of the developed technique the high level of adequacy to model to real conditions is reached.

Ряд исследований, проведенных в 90-х годах прошлого века и ведущихся сейчас, убедительно доказал несостоятельность применения плоских расчетных схем для расчета трехсводчатых станций метрополитена глубокого заложения типа пилонная или колонная [1-4]. Расчеты, основанные на разделении цельной пространственной станционной конструкции на ряд плоских схем (в проемной части, в пилонной части и перемычке), дают искаженное представление о напряженно-деформированном состоянии конструктивных элементов станции, так как не учитываются два важнейших фактора работы обделки станции метрополитена [4]. Первый фактор – пространственность работы обделки, которая кардинально меняет картину силовых факторов в элементах конструкции по сравнению с той же картиной в плоских расчетных схемах. Второй фактор – неразрывность работы всех конструктивных элементов станции, которая теряется при разделении конструкции на части и не может быть восполнена