

## МОРФОЛОГІЯ АГРЕГАТНИХ ВИДІЛЕНЬ ІЛЬМЕНІТУ З КІМБЕРЛІТІВ ТРУБКИ ПІВДЕННА (ПРИАЗОВ'Я)

*Наведено характеристику морфології агрегатних зерен ільменіту та його хімічного складу з кімберлітів трубки Південна в Приазов'ї. Зафіксовано етапи структурно-морфологічної перебудови монокристалічних зерен ільменіту в різні агрегати внаслідок імовірного процесу рекристалізації: від розпаду первинного зерна на дрібні субзерна ксеноморфної форми до перекристалізації їх в овальні, округлі та поліедричні субзерна. Виявлено близький хімічний склад усіх виділених морфологічних підтипів агрегатів ільменіту. Встановлено, що для субзерен агрегатів характерні збагачені магнієм внутрішні частини, манганом — зовнішні, відповідно, вони майже не містять мангану в ядрах, магнію — в периферійних зонах.*

Ільменіти (пікроільменіт, манганоільменіт, ільменіт) належать до найпоширеніших мінералів кімберлітів і ксенолітів ультраосновних порід у них [1, 4, 6, 7, 12, 13]. Ільменіти мають специфічну морфологію і досить неспостережуваний хімічний склад — переважно це твердий розчин у різному співвідношенні ільменітового, гейкелітового, пірофанітового і гематитового компонентів з відносно незначними домішками  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Багато питань генезису ільменіту з кімберлітів уже вирішено, однак, наприклад, його ксеногенність у цих породах не така очевидна, як для піропу і хромшпінеліду. Зовнішня і внутрішня морфологія ільменіту також ще слабовивчена. Тим не менше вже встановлені морфологічні й хімічні особливості зерен ільменіту з кімберлітів дають змогу використовувати його як індикатор цих порід.

**Морфологія виділень ільменіту з кімберлітів.** За спостереженнями багатьох дослідників, кристали цього мінералу з кімберлітів не мають огранення. Зрідка багатогранники ільменіту трапляються лише серед його мікрокристалів розміром менше 0,2 мм [3, 4]. Його зерна, розмірами від часток міліметра до 15 см, як правило, овальні, серед них за характером поверхні можна виділити два морфологічні типи: зерна з мікропірамідальним рельєфом (поєднання численних дрібних пірамідок різної морфології) і зерна з шорсткою поверхнею. Дуже часто зерна ільменіту в кімберлітах є полікристалічними, тобто мають агрегатну будову. Спостерігають також зерна з переходом від монокристалічної до агрегатної частини. Вважають [1, 2, 4], що агрегатний пікроільменіт має рекристалізаційну природу (рекристалізація деформованих

монокристалічних зерен за високих температур в умовах довготривалого перебування ільменіту в мантії). Чинники рекристалізації можуть бути різними [5, 8].

**Агрегатні зерна ільменіту з кімберлітів.** Ільменіт переважає у складі важких фракцій з кімберлітових тіл Приазов'я (трубки Надія, Південна, Новоласпинська) [11, 14]. Особливо багаті на ільменіт кімберліти трубки Південна, який став об'єктом наших морфологічних досліджень. Серед ільменіту з кімберлітів цієї трубки розрізняють декілька морфологічних типів зерен [14]: овальні виділення (жовна) розмірами 5—10 мм (рівномірно- і нерівномірно-зернисті агрегати), монокристалічні утворення розмірами до 1—3 мм, уламки зерен. Автори статті [11] стверджують, що серед зерен ільменіту з кімберлітів цієї трубки переважають неправильно-овальні, рідше сплюснені утворення (жовна). Їх розмір досягає 3 см у діаметрі. За внутрішньою будовою виділено два типи зерен: монокристалічні (складають приблизно третину всієї кількості) і агрегатні (так звані гранульовані) з їх поділом на два підтипи (зерна з чіткою розмежованістю між складовими зональними гранулами і зерна без видимих ознак меж між гранулами та їх зональності). Частіше в центральних частинах зерен містяться великі гранули овальної форми, тоді як у периферійних — дрібні гранули у великій кількості. Зональність багатьох зерен ільменіту з кімберлітів трубки Південна спостерігали також автори статті [14]: як характерна ознака вона видима в полірованих зрізах у відбитому світлі під бінокляром, а також під час сканування у режимі речовинного контрасту під електронним мікроскопом. Зональність таких зерен зумовлена різним хімічним складом їх внутрішніх і зовнішніх частин.

Детальне вивчення морфології зерен ільменіту із кімберлітів трубки Південна дало нам змогу підтвердити висновки публікацій [9, 11, 14] щодо розподілу цих зерен за основними морфологічними типами (моно- і полікристалічними утвореннями). Монокристалічні зерна мають неправильно-овально-кутасту чи овальну зовнішню форму, нерідко вони розміщуються в облямівці (рис. 1). Товщина облямівки різна, інколи досягає 1/4 частини діаметра зерна. Поверхня зерна під облямівкою відносно гладка чи з тонким шорстким рельєфом. Такий тип зерен рідкісний. Інші монокристалічні зерна з шорсткою поверхнею також мають неправильно-овально-кутасту форму і корозійний рельєф поверхні. Трапляються дуже рідко, як і овальні зерна, в яких можна бачити перехід від моно- до полікристалічної частини (рис. 2). Агрегатні зерна є найпоширенішими, їхня зовнішня форма овальна і овально-кутаста, іноді округла. За морфологією субзерен серед агрегатів можна виділити декілька морфологічних підтипів:

а) підтип 1 — агрегати, що складені із багатьох різних за розмірами і формою субзерен (рис. 3), переважають ксеноморфні субзерна;

б) підтип 2 — агрегати, що складені численними різними за розмірами неправильно-овальними (рідше округлими), часто сплюсненими субзернами (рис. 4);

в) підтип 3 — агрегати, що складені двома-трьома (підтип 3а, рис. 5) чи трохи більшою кількістю (підтип 3б, рис. 6) майже однакових чи різновеликих неправильно-овальних субзерен; поверхня цих утворень гладенька, межі між ними виразні;

г) підтип 4 — агрегати, в яких поєднуються поліедричні і неправильно-округлі чи овальні субзерна, часто поліедри переважають і мають майже однаковий розмір (рис. 7). Ребра і грані поліедрів також можуть бути дещо округлими.

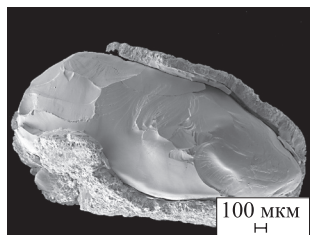


Рис. 1. Овальне монокристалльне зерно ільменіту в облямівці

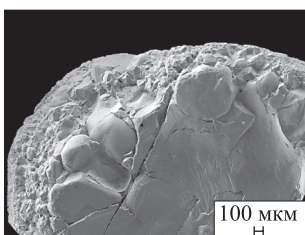


Рис. 2. Овальне зерно ільменіту з переходом від монокристалльної до полікристалічної частини

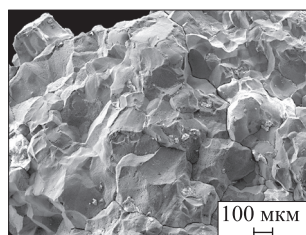


Рис. 3. Агрегат ільменіту, складений переважно із ксеноморфних дрібних субзерен

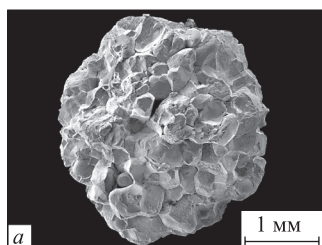


Рис. 4. Округлий агрегат ільменіту (а), складений переважно овальними, часто сплюсненими дрібними субзернами та рідкісними поліедрами; б, в — деталізація структури і форми субзерен

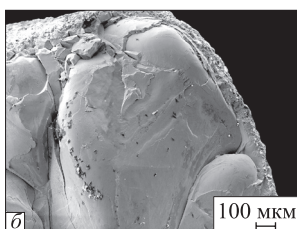
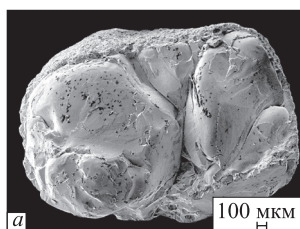
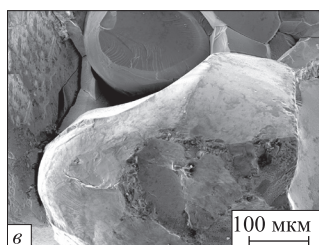
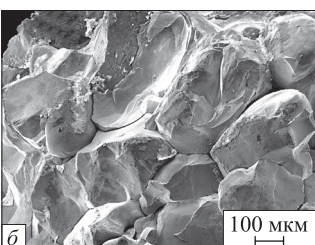
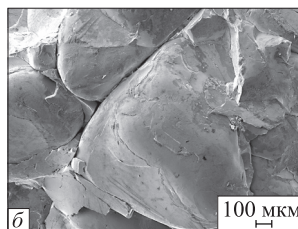
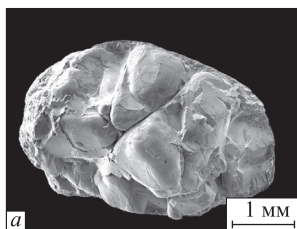


Рис. 5. Овальний агрегат ільменіту в тонкій облямівці:

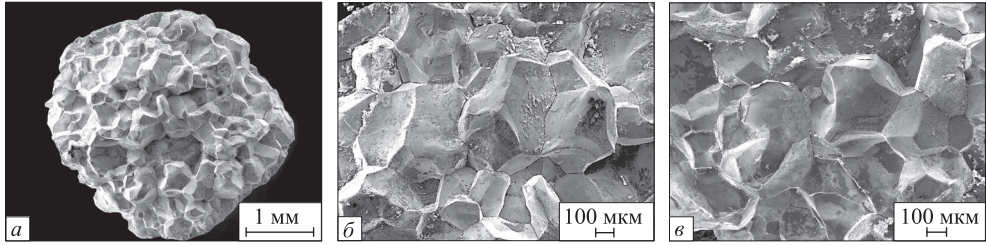
а — основний об'єм агрегату складають два овальні субзерна; б — деталізація поверхні субзерен, видно їх шкаралупчасту будову

Рис. 6. Овальний агрегат ільменіту в тонкій облямівці: а — великі неправильно-овальні субзерна агрегату; б — деталізація поверхні субзерен



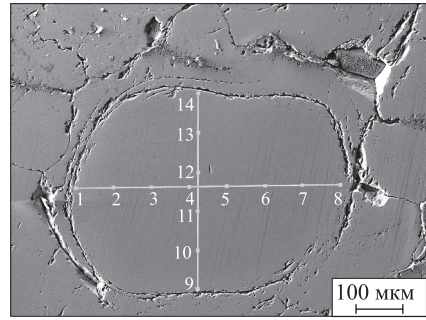
**Внутрішня будова агрегатних виділень ільменіту.** Як зазначено вище, автори робіт [11, 14] спостерігали зональну будову субзерен в агрегатах ільменіту — видиму і встановлену за різним хімічним складом внутрішніх і зовнішніх частин зерен. Зафіксовано значне збагачення зовнішніх частин субзерен ільменіту манганом і збіднення магнієм. За даними [13], слід розрізняти первинний ільменіт — пікроільменіт і вторинний ільменіт з манганом. Утворення останнього пройшло після рекристалізації зерен пікроільменіту.

У полірованих зрізах вивчених агрегатів і окремих зерен ільменіту з кімберлітів трубки Південна їх видиму зональність ми не спостерігали, однак її



**Рис. 7.** Округлий агрегат ільменіту, складений переважно із поледричних дрібних субзерен: *a* — загальний вигляд; *б, в* — деталізація структури і форми субзерен агрегату

**Рис. 8.** Овальне субзерно в агрегаті ільменіту, для якого вивчено хімічний склад по профілях. Полірований аншлиф агрегату



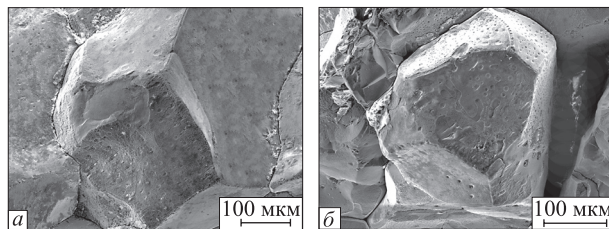
виявлено в цих зразках за розподілом магнію і мангану (рис. 8, табл. 1, 2). За хімічним складом виділені нами підтипи агрегатів ільменіту не розрізняються, їхнім субзернам властива вище означена зональність розподілу магнію і мангану. Помітно також зменшення вмісту титану і збільшення вмісту заліза у зовнішніх частинах субзерен.

**Обговорення.** Характерна морфологічна особливість зерен ільменіту з кімберлітів трубки Південна — їх агрегатна будова. Великі овальні зерна іль-

**Таблиця 1.** Хімічний склад овального субзерна ільменіту вздовж двох профілей на полірованому зрізі (див. рис. 8), %

| Місце і номер аналізу | MgO  | TiO <sub>2</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO  | FeO * |
|-----------------------|------|------------------|--------------------------------|------|-------|
| 1                     | 1,97 | 46,6             | 3,81                           | 3,72 | 43,9  |
| 2                     | 9,36 | 49,3             | 3,64                           | 0,10 | 37,6  |
| 3                     | 9,43 | 49,3             | 3,57                           | 0,10 | 37,6  |
| 4                     | 9,12 | 49,6             | 3,68                           | 0,10 | 37,5  |
| 5                     | 9,02 | 50,0             | 4,18                           | 0,10 | 36,7  |
| 6                     | 9,14 | 49,7             | 3,26                           | 0,10 | 37,8  |
| 7                     | 9,29 | 49,8             | 3,41                           | 0,10 | 37,4  |
| 8                     | 1,93 | 47,5             | 3,36                           | 3,61 | 43,6  |
| 9                     | 0,10 | 46,7             | 3,59                           | 4,41 | 45,2  |
| 10                    | 8,72 | 50,0             | 3,88                           | 0,10 | 37,3  |
| 11                    | 9,16 | 49,6             | 3,84                           | 0,10 | 37,3  |
| 12                    | 9,18 | 49,6             | 3,92                           | 0,10 | 37,2  |
| 13                    | 9,19 | 49,2             | 3,81                           | 0,10 | 37,7  |
| 14                    | 3,21 | 47,9             | 3,58                           | 3,51 | 41,8  |

\* Вміст загального заліза перераховано на вміст FeO. Аналізи виконано в ІГМР ім. М.П. Семеновка НАН України на сканувальному електронному мікроскопі JSM-6700F з енергодисперсійною системою для мікроаналізу JED-2300 (JEOL, Японія).



**Рис. 9.** Поліедри Коксета різної досконалості в агрегатах ільменіту:

*a* — недосконалий поліедр; *б* — майже досконалий поліедр, за формою нагадує пентагон-додекаедричний кристал

меніту переважно є полікристалічними утвореннями. Часто агрегати мають нерівномірнозернисту будову, тобто розмір їх складових частин різний. Така морфологія є типовою для ільменіту з кімберлітів багатьох провінцій світу. Вище згадувалось, що найбільш аргументоване пояснення природи агрегатного ільменіту — це рекристалізація деформованих монокристалічних зерен в умовах високої температури. Пікроільменіт відносять до найбільш деформованих мінералів із усіх глибинних мінералів кімберлітів.

Явище рекристалізації — це розпад кристала на субзерна. Вона виникає під впливом температури, механічної деформації і зі зняттям напруження [5, 8]. У перших випадках явище відбувається з поглинанням енергії, в останньому — зі звільненням енергії, коли знімається внутрішнє напруження кристалічної ґратки мінералу. Внаслідок розвитку міжзернових меж збільшується поверхнева енергія агрегату, але при цьому суттєво зменшується його внутрішнє об'ємне напруження. З часом субзерна намагаються набути однакового розміру і форми ізометричного поліедра (тобто рівноважної плоскогогранної форми), число псевдограней на них зменшується і наближається до 14 (ідеальний поліедр Коксета має 13,56 граней, 23,13 вершин і 34,69 ребер [5]). Найстійкіша форма псевдограней — п'ятикутна. Таким чином досягаються мінімуми питомої площі міжзернових поверхонь і поверхневої енергії для кожного субзерна. Поліедри Коксета мають геометричну подібність до пентагон-додекаедрів і кубооктаедрів. Однак кристалічна ґратка такого поліедра орієнтована відносно його псевдограней довільно, тобто псевдограні не належать до граней простих форм, властивих багатогранникам мінералу. За даними [10], рекристалізація пікроільменіту вже помітна після 5 год нагрівання його зерен при 600 °С. Очевидно, що за довготривалого перебування ільменіту в мантійних умовах, він міг зазнавати впливу вищих температур.

**Таблиця 2.** Хімічний склад окремих субзерен ільменіту з різних агрегатів (у полірованих зрізах), %

| Підтип агрегатів | MgO         |            | TiO <sub>2</sub> |            | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |            | MnO         |            | FeO *       |            |
|------------------|-------------|------------|------------------|------------|--------------------------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
|                  | Центр зерна | Край зерна | Центр зерна      | Край зерна | Центр зерна                    | Край зерна | Центр зерна | Край зерна | Центр зерна | Край зерна |
| 2                | 6,60        | 0,1        | 49,3             | 48,5       | 2,43                           | 2,16       | 1,17        | 5,24       | 40,5        | 44,0       |
| 3a               | 9,59        | 1,26       | 52,1             | 49,5       | 0,32                           | 0,38       | 0,09        | 6,26       | 37,9        | 42,6       |
| 3б               | 9,44        | 0,1        | 49,0             | 47,7       | 1,96                           | 1,90       | 0,1         | 4,50       | 39,5        | 45,8       |
| 4                | 9,14        | 1,97       | 50,0             | 46,6       | 4,16                           | 3,81       | 0,1         | 3,72       | 36,6        | 43,9       |
| Окреме зерно **  | 7,52        | 0,1        | 49,0             | 48,2       | 2,08                           | 1,63       | 0,1         | 5,77       | 41,3        | 44,3       |

\* Вміст загального заліза перераховано на вміст FeO. \*\* Одиначне овально-кутасте монокристалічне зерно; найімовірніше, воно належало агрегату.

На вивчених агрегатах ільменіту з кімберлітів трубки Південна ми спостерігаємо різні етапи морфологічно-структурної перебудови зерен (див. рис. 2—7). Нагрівання деформованих монокристалічних зерен ільменіту привело до їх розпаду на субзерна — відбулась заміна великих дефектних зерен агрегатами із малодефектних зерен. Отже, кожне велике зерно ільменіту досягло рівноважної форми. Помітною є тенденція набування субзернами ізометричної плоскогранної форми, тобто досягнення найвищого мінімуму поверхневої енергії. Тому серед агрегатних зерен ми спостерігаємо перехідний ряд від ксеноморфних субзерен до комбінації овальних і округлих субзерен (у тім числі до агрегатів, складених двома-трьома великими овальними субзернами — збільшення розміру цих зерен унаслідок розчинення дрібніших зерен) та поліедричних утворень. При цьому виникали так звані кристали Коксетера — різні за досконалістю “багатогранники” (рис. 9) як результат досягнення ними мінімальної поверхневої енергії для кожного індивіду. Хоч субзерна намагаються набути ідеальної ізометричної форми, все ж цьому заважає анізотропія кристалічної структури ільменіту (тригональна симетрія), тому часто вони мають сплющений вигляд. За такого процесу досягається мінімум питомої площі міжзернових поверхонь, тобто мінімум міжзернової енергії. Отже, поліедричні, овальні та округлі форми субзерен в агрегатах ільменіту є компромісом рівноваги розподілу міжзернової енергії, анізотропії кристалічної ґратки мінералу і поверхневої енергії кожного субіндивіда. Така еволюція форми зерен ільменіту може бути якісним показником для оцінки параметрів і тривалості температурного впливу, що зазнав мінерал.

Щодо особливостей внутрішньої будови виділень ільменіту з кімберлітів трубки Південна, то збагачення манганом зовнішніх зон зерен пікроільменіту з кімберлітів відзначено багатьма дослідниками (див. огляд публікацій про мангановий ільменіт у статті [6]). Наприклад, дуже подібна до нашої ситуації картина розподілу Mg і Mn спостерігалась у зернах ільменіту із кімберлітів трубки Прем'єр (Південна Африка) — поступовий перехід від багатих на MgO ядер до збагачених MnO зовнішніх зон (до 9 % MnO) [15]. Вважається, що це є результатом реакційної взаємодії зерен ільменіту із збагаченою карбонатом основною масою на пізній стадії еволюції кімберлітів або такий ільменіт належить до післямагматичних утворень, пов'язаних з процесами пізнього метасоматозу. Разом з тим широкий розвиток морфологічної перебудови під час рекристалізації зерен ільменіту може приводити до інтенсивного дифузійного процесу — до очищення зерен ільменіту від нестехіометричних домішок і, можливо, до міграції основних мінералоутворювальних елементів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П. Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. — Новосибирск: Наука. — 2001. — 276 с.
2. Афанасьев В.П., Харьков А.Д. Об агрегатном пикроильмените из кимберлитов // Геология и геофизика. — 1980. — № 4. — С. 37—46.
3. Благулькина В.А., Губанов В.А., Уманец В.Н., Футергендлер С.И. Микрорекристаллы ильменита из кимберлитов Лучаканского района // Минералы и парагенезисы минералов эндогенных месторождений. — Л.: Наука, 1975. — С. 11—18.
4. Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Сошкина Л.Т. Ильменит из кимберлитов. — М.: Изд-во МГУ, 1984. — 240 с.
5. Жабин А.Г. Онтогенез минералов. — М.: Наука, 1979. — 276 с.
6. Каминский Ф.В., Белоусова Е.А. Манганоильменит как минерал-спутник алмаза в кимберлитах // Геология и геофизика. — 2009. — 50, № 12. — С. 1560—1570.
7. Костровицкий С.И. Минералогия и геохимия кимберлитов Западной Якутии: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. — Иркутск, 2009. — 43 с.

8. Остапенко Г.Т. Рекристаллизация минералов в условиях стресса // Геохимия. — 1968. — № 2. — С. 234—237.
9. Панов Ю.Б. Типохимизм минералов-спутников алмаза из кимберлитов Приазовья: Автореф. дис. ... канд. геол. наук. — Киев, 2001. — 19 с.
10. Сергеева В.Е. Электронно-микроскопическое изучение микроморфологии пикроильменита из кимберлитовых трубок Якутии // Вестн. МГУ. Геология. — 1970. — № 3. — С. 53—59.
11. Смирнов Г.И., Чашка А.И., Тарасюк О.Н. и др. Ильменит из кимберлитов Приазовья // Минерал. журн. — 1993. — 15, № 3. — С. 33—41.
12. Тарских О.В. Типоморфизм гранатов и пикроильменитов из кимберлитов различной продуктивности (на примере Якутской кимберлитовой провинции): Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — Новосибирск, 2009. — 18 с.
13. Харькив А.Д., Квасниця В.Н., Сафронов А.Ф., Зинчук Н.Н. Типоморфизм алмаза и его минералов-спутников из кимберлитов. — К.: Наук. думка, 1989. — 184 с.
14. Цымбал С.Н., Татаринцев В.И., Князьков А.П. Минералы глубинных парагенезисов из кимберлитов трубки Южная (Восточное Приазовье) // Минерал. журн. — 1996. — 18, № 5. — С. 18—45.
15. Wyatt B.A. Manganoan ilmenite from the Premier kimberlite // Kimberlite Sympos. II, Extended Abstr. — Cambridge, 1979. — P. 279—284.

Надійшла 01.06.2010

*V.M. Kvasnytsya, Yu.O. Lytvynenko, O.A. Vyshnevskiy, O.I. Chashka*

#### MORPHOLOGY OF AGGREGATE ILMENITE FROM “PIVDENNA” KIMBERLITE PIPE (EASTERN PERI-AZOVIAN AREA)

Morphology and chemical composition of ilmenite aggregate grains from “Pivdenna” kimberlite pipe (Eastern Peri-Azovian area) are described. The stages of structural-morphological transformation from monocrystals to aggregates (desintegration of primary grain into small xenomorphic subgrains with their further transformation to rounded, semirounded and finally polyhedron-subgrains), due to possible recrystallization process, are shown. Chemical composition of all morphological types of ilmenite aggregates is similar. The subgrains have enriched in Mg inner and in Mn outer parts, accordingly, they contain minimum of Mn in the cores and Mg in the external zones.

*V.N. Kvasnytsya, Yu.A. Lytvynenko, A.A. Vyshnevskiy, A.I. Chashka*

#### МОРФОЛОГИЯ АГРЕГАТНЫХ ВЫДЕЛЕНИЙ ИЛЬМЕНИТА ИЗ КИМБЕРЛИТОВ ТРУБКИ ЮЖНАЯ (ПРИАЗОВЬЕ)

Приведена характеристика морфологии агрегатных зерен ильменита и их химического состава из кимберлитов трубки Южная в Приазовье. Зафиксированы этапы структурно-морфологической перестройки монокристалльных зерен ильменита в разные агрегаты вследствие вероятного процесса рекристаллизации: от распада первичного зерна на мелкие субзерна ксеноморфной формы до перекристаллизации их в овальные, округлые и полиэдрические субзерна. Установлен близкий химический состав всех выделенных морфологических подтипов агрегатов. Для субзерен агрегатов характерны обогащенные магнием внутренние и марганцем внешние части, соответственно, они почти не содержат марганца в ядрах и магния — во внешних зонах.