

## МИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В САПФИРАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БО ФЛОЙ (Канчанабури, Западный Таиланд), АССОЦИИРОВАННОГО С БАЗАЛЬТАМИ: ОСОБЕННОСТИ ИХ ГЕНЕЗИСА

П. Хамлоет<sup>1</sup>, В. Писута-Арнонд<sup>1,2</sup>, С. Суттират<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Patumwan, Bangkok, 10330, Thailand

<sup>2</sup> The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization),  
ITF-Tower Building, Suriyawong, Bangkok, 10550, Thailand

Месторождение драгоценных камней Бо Флой в провинции Канчанабури (Западный Таиланд) тесно ассоциирует с кайнозойскими базальтами. Более трех десятилетий из этой залежи наряду с желтоватыми разновидностями сапфиров добывают голубые сапфиры, а также черную шпинель и незначительное количество циркона. Среди минеральных включений в образцах сапфира наблюдаются щелочной полевой шпат, нефелин, герцинитовая разность шпинели, циркон, марганецсодержащий ильменит, богатый кремнеземом энстатит, гранат альмандин-пироповой группы, монацит, кальцит, сапфирин, биотит-флогопитовая слюда и ставролит. По геохимическим признакам эти минеральные включения можно отнести к двум основным группам, а именно фельзитовой щелочной серии и к контактово-метаморфической серии, которые, по-видимому, являются продуктами различных процессов. Эти включения предоставляют новые свидетельства в пользу бимодальной генетической модели. Во-первых, предположение о генезисе сапфиров, связанном с фельзитовым, высокощелочным расплавом, основывается на встречаемости включений фельзитовой щелочной серии и данных геохимии РЗЭ цирконов, ассоциирующих с сапфирами, которые свидетельствуют о том, что большинство сапфиров, по-видимому, кристаллизовалось в среде, связанной с фельзитовым расплавом с высоким содержанием щелочей, вероятно, в условиях нижней коры. Во-вторых, в пользу контактово-метаморфического происхождения свидетельствуют находки включений контактово-метаморфической серии, позволяющие предположить, что часть сапфиров могла образоваться из метасоматизированных коровых пород и контаминированного расплава в контактовой зоне базальтовой интрузии, вероятно, в условиях верхней мантии или нижней коры.

*Кайнозойский базальт, базальтовый сапфир, месторождение драгоценных камней Бо Флой, генетическая модель.*

## MINERAL INCLUSIONS IN SAPPHIRE FROM THE BASALT-RELATED DEPOSIT IN BO PHLOI, (Kanchanaburi, Western Thailand): INDICATION OF THEIR GENESIS

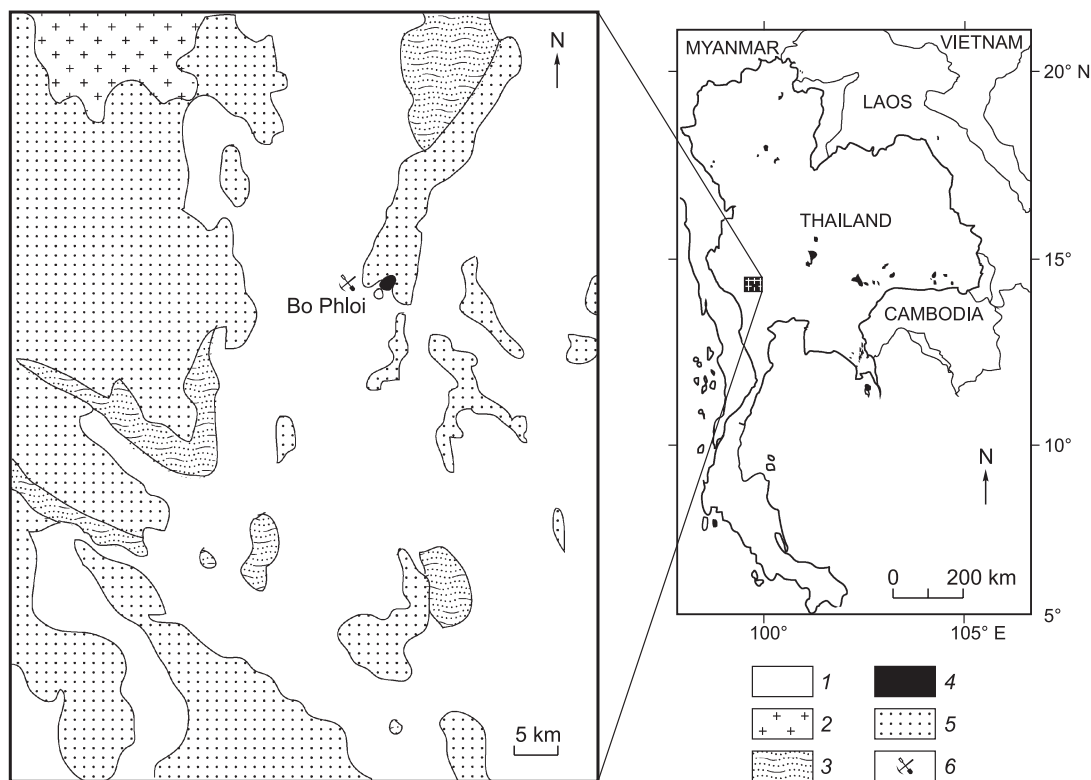
P. Khamloet, V. Pisutha-Arnond, and C. Sutthirat

The Bo Phloi gem field in Kanchanaburi Province, Western Thailand, is closely associated with Cenozoic basalts. Blue and yellow sapphire, black spinel, and minor zircon have been mined for over three decades. The mineral inclusions observed in sapphire samples are alkali feldspar, nepheline, hercynitic spinel, zircon, manganiferous ilmenite, silica-rich enstatite, almandine-pyrope garnet, monazite, calcite, sapphirine, biotite-phlogopite mica, and staurolite. Based on their geochemical affinity, these mineral inclusions can be categorized into two main groups: felsic alkaline and contact-metamorphic, which appear to have originated from different processes. These inclusions provide new evidence for proposing a bimodal genetic model. Felsic alkaline origin is evidenced by the occurrence of a felsic alkaline inclusion suite and the REE geochemistry of sapphire-associated zircon, which indicates that most of the sapphires crystallized from a high-alkali felsic melt (probably, in the lower crust). Contact-metamorphic origin is evidenced by the presence of a contact-metamorphic inclusion suite, suggesting that some of these sapphires might also have originated from metasomatized crustal rocks and a contaminated melt along the contact zone of a basaltic intrusion (probably, in the upper mantle or lower crust).

*Cenozoic basalt, basaltic sapphire, Bo Phloi gem deposit, genetic model*

### ВВЕДЕНИЕ

Залежь драгоценных камней Бо Флой в провинции Канчанабури (Западный Таиланд) (рис. 1) является хорошо известным месторождением драгоценного корунда, с которого добываются и поставляются на мировой рынок большие количества голубого и в меньших объемах желтого сапфира хорошего качества. Оно является крупнейшим россыпным месторождением сапфиров в ЮВ Азии. Как правило,



**Рис. 1. Геологическая карта района месторождения драгоценных камней Бо Флой, провинция Канчанабури, Западный Таиланд (с изменениями, по [Vichit et al., 1978]).**

1 — осадочные породы третичного возраста, 2 — мезозойский гранит, 3 — докембрийский комплекс, 4 — кайнозойские базальты, 5 — палеозойские толщи, 6 — основная площадь добычи сапфиров.

сапфиры Бо Флой находят во вторичных залежах, образовавшихся по выветрелому щелочному базальту, коренные выходы которого наблюдаются в Хао Лантом вблизи г. Бо Флой и в местечке Хуай Мака Бан Чонг Дан, в 6 км к северу от г. Бо Флой. Открытые разработки на участке Бо Флой в целом приурочены к богатому сапфиноносному рудному галечному слою мощностью около 3 м, залегающему на глубине 13—15 м [Hansawek, Pattamalai, 1997]. Вмещающие сапфиры базальты Бо Флой представлены темными плотными разностями тонкозернистых и порфириновых пород. Часто наблюдаются мегакристаллы клинопироксена, черной шпинели, санидина, оливина, анортоклаза; описаны также нодулы ультрамафитов (особенно шпинелевых лерцолитов) и ксенолиты гнейсов [Sutthirat et al., 1999, 2001; Sutthirat, 2001; Srithai, 2005]. Кроме того, мегакристаллы базальтов Бо Флой представлены нефелином, Al-Ti магнетитом и, что особенно важно, корундом [Pisutha-Arnond et al., 1999, 2005]. Эти базальты Вичит [Vichit et al., 1978] классифицировал как базанитоиды, а Барр и Макдоналд [Barr, Macdonald, 1978, 1981] и Яемнийом и Понгсапич [Yaemniyom, Pongsapich, 1982] — как нефелиновые гавайиты. Для базальтов Бо Флой имеются несколько геохронологических датировок: K/Ar датировка  $3.14 \pm 0.17$  млн лет [Barr, Macdonald, 1981] и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датировка  $4.17 \pm 0.11$  млн лет [Sutthirat et al., 1994].

Результаты углубленного изучения минеральных включений в сапфирах Бо Флой опубликованы несколькими исследователями. Саминпанья [Saminpanya, 2000] сообщил о включении нефелина ( $\text{Ne}_{68,3}\text{Ks}_{28,6}\text{Q}_3$ ) и предложил генетическую модель, связанную с нефелиновыми сиенитами. Включение богатой Со шпинели описали Гуо и др. [Guo et al., 1994], поэтому в качестве возможного механизма образования шпинели и сапфира в этом участке земной коры они предложили сложный процесс смешения магм, представленных богатым щелочами фельзитовым расплавом и бедным кремнеземом карбонатитовым расплавом, в условиях нижней коры. Кроме того, Писута-Арнонд с соавторами [Pisutha-Arnond et al., 1999, 2005] предложили генетическую модель образования сапфиров Бо Флой, базирующуюся на гальке «Corsilzirspite» (ассоциация корунд + силлиманит + циркон + шпинель), найденную в сапфиноносном слое и сериях минеральных включений в сапфирах (в т.ч. щелочной полевой шпат, циркон, монацит, герцинитовая шпинель, оксид Nb, манганоанилменит, нефелин, пирохлор (?), торит (?), биотит (?) и кальцит), которые могли образоваться в результате процессов метаморфизма(метасоматоза) конта-

минации при взаимодействии габброидного расплава и богатых Al коровых пород. Несмотря на большее количество типов минеральных включений, рассмотренных в последнем отчете, химический состав минералов приведен не полностью.

В связи с этим выполнено детальное изучение химического состава минералов всех типов минеральных включений в сапфирах Бо Флой, что является основной темой данной работы. Затем, до разработки более достоверной генетической модели эти химические анализы минералов используются для уточнения условий кристаллизации сапфира и их включений.

### ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сапфиры Бо Флой, исследованные в данной работе, отобраны непосредственно из местных выработок в рудном поле Бо Флой. Отобранные сапфиры представляют собой концентрат фракции 2 мм, который является представительным для большей части самоцветов этого рудного поля. Для исследования было отобрано более 170 зерен сапфира, которые содержат множество минеральных включений. По внешней окраске все зерна разделены на две основные разновидности: бурые, синие сапфиры. При этом бурые сапфиры имеют два цветовых оттенка: темно-бурые (45 образцов) и светло-бурые (48 образцов), а в группе синих сапфира выделены голубые (50 образцов) и светло-голубые (30 образцов) разновидности (рис. 2).

Необработанные зерна исследовались под бинокулярным микроскопом для отбора подходящих образцов, содержащих многочисленные включения, перед погружением в эпоксидную смолу. Образцы с крупными минеральными включениями тщательно полировали до выхода включений на поверхность. Поскольку большинство минеральных включений, содержащихся в сапфирах, имеют очень небольшие размеры (< 50 мкм), для изучения их морфологии использовался микроскоп с большим увеличением.

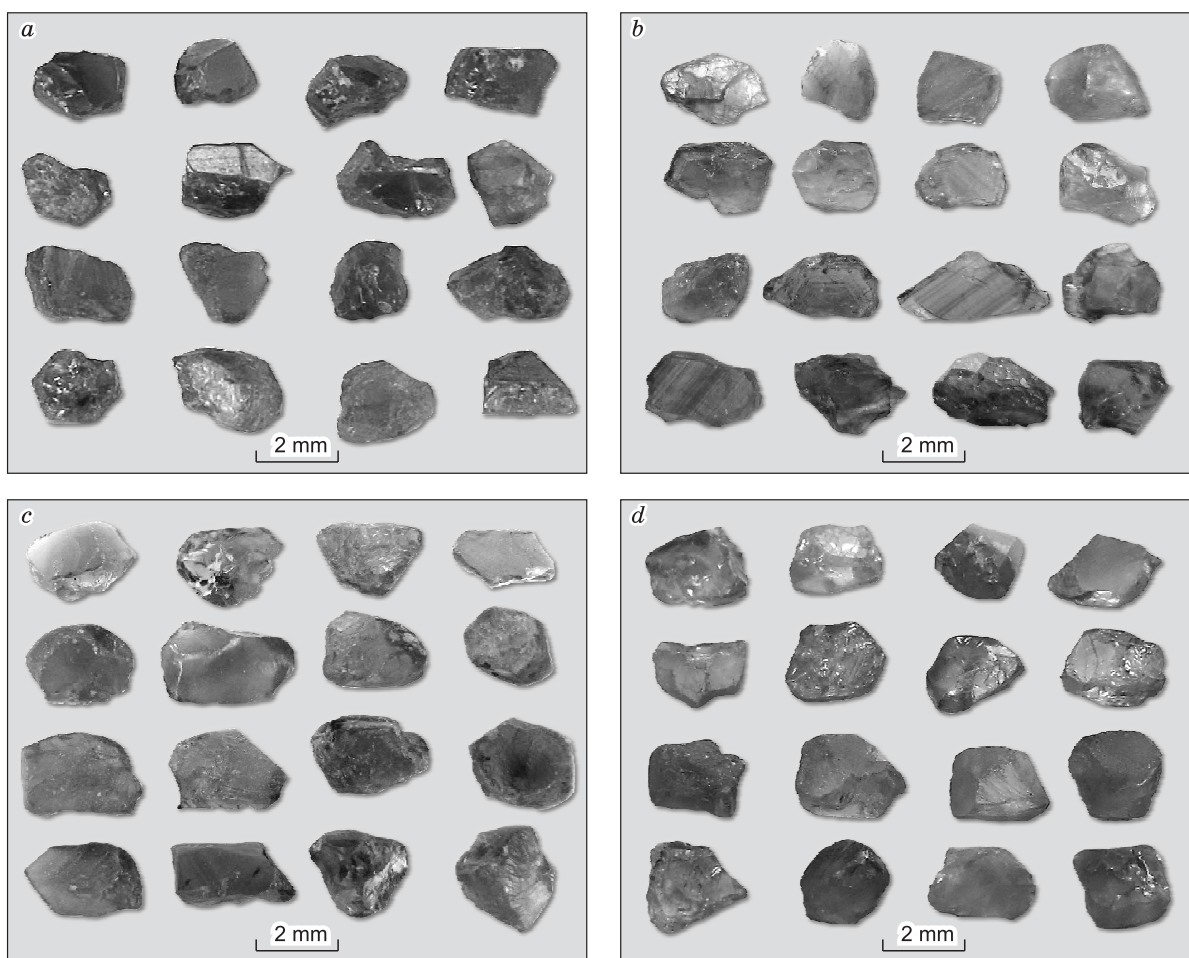


Рис. 2. Четыре разновидности образцов сапфира Бо Флой, использованные в данной работе.

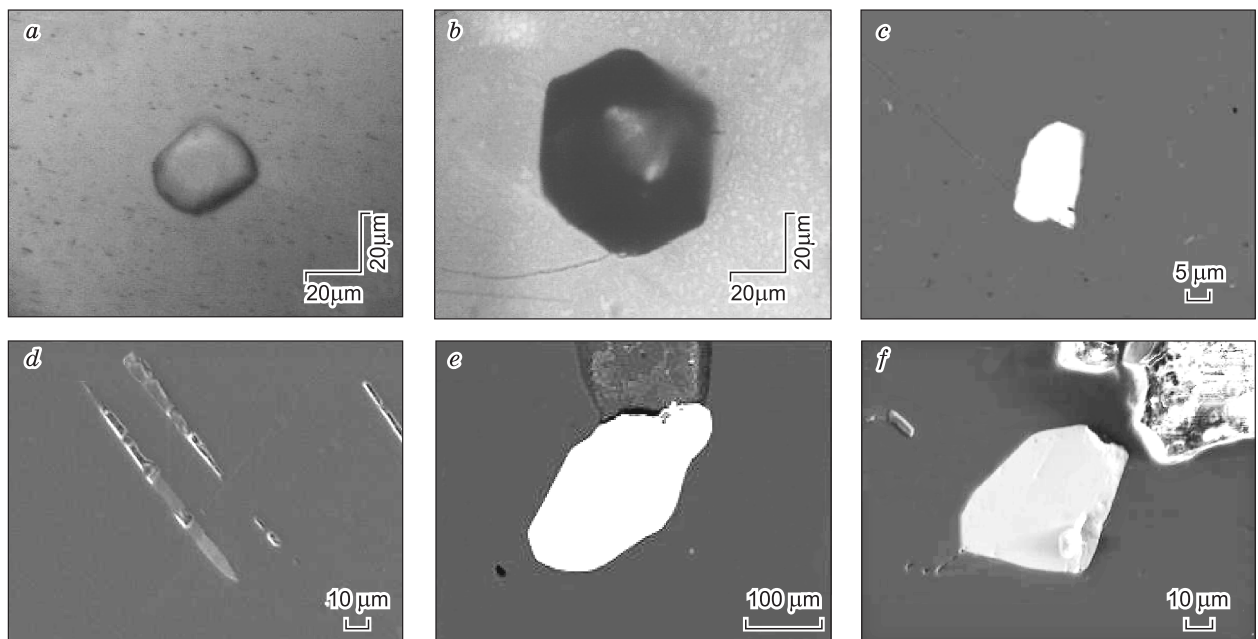
*a* — темно-бурые; *b* — светло-бурые; *c* — голубые и *d* — светло-голубые.

После изучения под микроскопом отобранные образцы каждой группы подвергали напылению углеродом для анализа главных компонентов минеральных включений с использованием метода электронного микронзондирования (EPMA) на микронзонде JEOL модели JXA-8100 в Университете Чулалонкорн, департамент геологии, кафедра естественных наук. Режим проведения анализа: ускоряющее напряжение 15.0 кВ, ток электронного пучка около 24 нА, диаметр сфокусированного электронного пучка менее 1 мкм. Для калибровки использованы минеральный стандарт и стандарт чистого оксида. До автоматического выполнения процедуры ZAF-коррекции время счета составляло 30 с для каждого элемента, при этом использовались соответствующие аналитические кристаллы, а результаты анализа выводились в виде мас. % оксидов анализируемых элементов. Отношения  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  для некоторых железосодержащих минералов пересчитывали с использованием уравнения [Droop, 1987]. Кроме того, в работе использовался метод лазерной абляции с индуктивно связанной плазменной масс-спектрометрией (LA-ICP-MS) для анализа редких элементов в цирконовых включениях. Этот анализ выполнялся с использованием анализатора модели Perkin-Elmer ELAN 6000 ICPMS, объединенного с микроскопом для наблюдения лазерной абляции и базирующегося в Университете Маккури, GEMOC, Австралия. Подробное описание установки, а также аналитических и калибровочных процедур приведено в работе [Belousova et al., 2002].

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Сводные данные по минеральным включениям каждой группы образцов приведены в табл. 1. Несколько микрофотографий и изображений минеральных включений в обратнорассеянном свете показаны на рис. 3. Представительные микронзондовые анализы этих включений представлены в табл. 2—7. Детальное описание каждого минерального включения приведено ниже.

**Полевой шпат.** Наиболее часто встречающимися минеральными включениями в сапфирах являются полевошпатовые включения, обнаруженные во всех окрашенных разновидностях сапфиров Бо Флой (см. рис. 3, *a*), однако чаще полевой шпат фиксируется в голубых и светло-голубых разновидностях сапфиров. В табл. 2 для сравнения приведены представительные микронзондовые анализы включений полевых шпатов, полученные по всем окрашенным разновидностям сапфиров Бо Флой. На тройной диаграмме атомных соотношений Ca-Na-K (рис. 4) видно, что составы всех полевошпатовых включений в исследованных сапфирах Бо Флой попадают в область богатого Na или альбитового компонента при низких до умеренных содержаниях K и низких содержаниях Ca. По таким составам эти включения однозначно классифицируются как щелочной полевой шпат. Фактически, о находках существенно Na полевошпатовых (альбитовых) включений близкого химического состава в голубых и бурых разновидностях сапфиров Бо Флой ранее сообщили Писута-Арнонд с коллегами [Pisutha-Arnond et al., 1999].



**Рис. 3. Микрофотографии включений.**

*a* — полевого шпата, *b* — шпинели; изображения включений в обратнорассеянных электронах (BSI) (*c*) шпинели, (*d*) ильменита, (*e*) циркона и (*f*) монацита, обнаруженных в темно-бурых разновидностях сапфиров.

Таблица 1. Сводные данные по минеральным включениям в сапфирах Бо Флой

| Минеральная группа | Минеральное включение | Бурые сапфиры |              | Голубые сапфиры |                |
|--------------------|-----------------------|---------------|--------------|-----------------|----------------|
|                    |                       | темно-серые   | светло-серые | голубые         | светло-голубые |
|                    |                       | (45)          | (48)         | (50)            | (30)           |
| Силикаты           | Циркон                | ***           | **           | **              | **             |
|                    | Полевой шпат          | **            | **           | ***             | ***            |
|                    | Нефелин               | **            | ***          | **              | —              |
|                    | Энстатит              | ***           | **           | **              | —              |
|                    | Гранат                | **            | *            | —               | —              |
|                    | Сапфирин              | —             | *            | *               | —              |
|                    | Слюда                 | *             | —            | —               | —              |
|                    | Ставролит             | —             | *            | —               | —              |
| Оксиды             | Шпинель               | ***           | ***          | —               | —              |
|                    | Ильменит              | **            | —            | —               | **             |
| Карбонаты          | Кальцит               | *             | —            | —               | —              |
| Фосфаты            | Монацит               | ***           | —            | —               | —              |

Примечание. В скобках — число образцов. Прочерк — не обнаружены.

\* Редко встречаются.

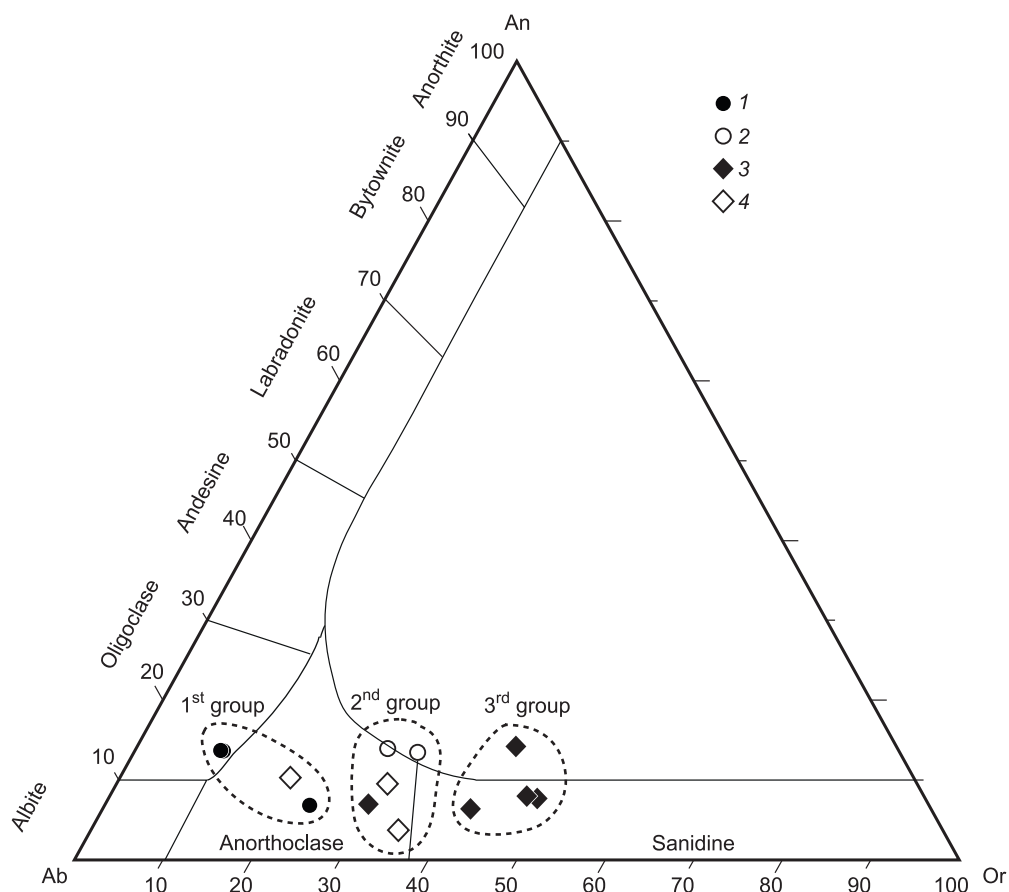
\*\* Встречаются.

\*\*\* Часто встречаются.

Таблица 2. Представительные микрозондовые анализы включений полевых шпатов в сапфирах Бо Флой

| Компонент                      | Бурые сапфиры |        |              |        | Голубые сапфиры |       |                |        |
|--------------------------------|---------------|--------|--------------|--------|-----------------|-------|----------------|--------|
|                                | темно-серые   |        | светло-серые |        | голубые         |       | светло-голубые |        |
|                                | 1C4ia2-1      | 1C4ib2 | 3LGC1g-3     | 3LGC3c | 3BD3a           | 3BD1a | 3LBA2g         | 3LBB6a |
| SiO <sub>2</sub> , мас. %      | 63.84         | 63.69  | 64.81        | 64.00  | 65.60           | 63.55 | 63.09          | 65.88  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.05          | 0.05   | 0.06         | 0.01   | 0.01            | 0.02  | 0.03           | 0.04   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 22.14         | 22.18  | 26.30        | 26.20  | 21.50           | 20.50 | 21.80          | 19.56  |
| FeO                            | 0.05          | 0.05   | 0.38         | 0.10   | 0.04            | 0.05  | 0.06           | 0.07   |
| MnO                            | 0.03          | 0.02   | 0.09         | 0.03   | 0.00            | 0.00  | 0.03           | 0.01   |
| MgO                            | 0.01          | 0.00   | 0.05         | 0.00   | 0.05            | 0.01  | 0.00           | 0.01   |
| BaO                            | 0.03          | 0.02   | н.а.         | н.а.   | н.а.            | н.а.  | 0.07           | 0.00   |
| CaO                            | 2.69          | 2.71   | 1.96         | 2.01   | 2.59            | 1.62  | 2.07           | 0.83   |
| Na <sub>2</sub> O              | 8.32          | 8.38   | 4.39         | 5.11   | 4.31            | 5.11  | 7.20           | 7.57   |
| K <sub>2</sub> O               | 1.66          | 1.61   | 3.93         | 3.45   | 6.52            | 8.59  | 5.60           | 6.50   |
| Сумма                          | 98.82         | 98.71  | 101.97       | 100.91 | 100.62          | 99.45 | 99.95          | 100.45 |
| <b>Формула 8(O)</b>            |               |        |              |        |                 |       |                |        |
| Si                             | 2.853         | 2.850  | 2.794        | 2.786  | 2.908           | 2.895 | 2.841          | 2.947  |
| Ti                             | 0.002         | 0.002  | 0.002        | 0.000  | 0.000           | 0.001 | 0.001          | 0.001  |
| Al                             | 1.166         | 1.170  | 1.337        | 1.344  | 1.124           | 1.101 | 1.157          | 1.031  |
| Fe                             | 0.002         | 0.002  | 0.014        | 0.004  | 0.002           | 0.002 | 0.002          | 0.003  |
| Mn                             | 0.001         | 0.001  | 0.003        | 0.001  | 0.000           | 0.000 | 0.001          | 0.000  |
| Mg                             | 0.000         | 0.000  | 0.003        | 0.000  | 0.003           | 0.001 | 0.000          | 0.001  |
| Ba                             | 0.001         | 0.000  | —            | —      | —               | —     | 0.001          | 0.000  |
| Ca                             | 0.129         | 0.130  | 0.091        | 0.094  | 0.123           | 0.079 | 0.100          | 0.040  |
| Na                             | 0.721         | 0.727  | 0.367        | 0.431  | 0.371           | 0.451 | 0.628          | 0.656  |
| K                              | 0.095         | 0.092  | 0.216        | 0.192  | 0.369           | 0.499 | 0.321          | 0.371  |
| Сумма                          | 4.970         | 4.973  | 4.827        | 4.853  | 4.899           | 5.029 | 5.054          | 5.050  |
| Na, ат. %                      | 76.3          | 76.6   | 54.5         | 60.2   | 43.0            | 43.8  | 59.9           | 61.5   |
| Ca                             | 13.6          | 13.7   | 13.5         | 13.1   | 14.2            | 7.7   | 9.5            | 3.7    |
| K                              | 10.0          | 9.7    | 32.1         | 26.7   | 42.8            | 48.5  | 30.6           | 34.8   |

Примечание. н.а. — не анализировалось.



**Рис. 4. Тройная диаграмма для включений щелочных полевых шпатов в сапфирах Бо Флой.**

1 — темно-бурые сапфиры, 2 — светло-бурые сапфиры, 3 — голубые сапфиры, 4 — светло-голубые сапфиры.

Однако полевошпатовые включения в темно-бурых сапфирах имеют несколько более натровый состав по сравнению со светло-бурыми и светло-голубыми разновидностями сапфира, при этом полевошпатовые включения в синих сапфирах более обогащены калием. Таким образом, можно выделить три группы полевошпатовых включений (см. рис. 4): первая группа характеризуется диапазоном составов  $Ab_{70-77}Or_{9-23}An_{6-14}$ , и в этот диапазон попадают все анализы темно-бурых сапфира и один анализ светло-голубых порфира. Во вторую группу ( $Ab_{52-63}Or_{28-35}An_{3-14}$ ) попадают анализы включений, зафиксированных во всех исследованных светло-бурых сапфирах, нескольких светло-голубых и нескольких голубых сапфирах. В третью группу ( $Ab_{42-45}Or_{42-49}An_{7-14}$ ) попадают анализы полевошпатовых включений только из голубых сапфира. По-видимому, образование голубых сапфира связано со средой, обогащенной K, тогда как бурые сапфиры формировались в более натриевой среде. Вероятно, светло-голубые и светло-бурые сапфиры образовывались в среде, переходной между вышеуказанными.

**Нефелин.** Включения нефелина обнаружены почти во всех разновидностях сапфира Бо Флой за исключением светло-голубых сапфира. Представительные микрозондовые анализы нефелиновых включений приведены в табл. 3.

Все анализы нефелина показывают высокое содержание натрия ( $Na_2O \sim 14-18\%$ ), при этом атомные соотношения соответствуют обычному химизму нефелина; только одно включение нефелина в голубом сапфире (обр. ЗВА3г) имеет слегка повышенное содержание калия ( $Na_{5,238}K_{1,969}Al_{8,073}Si_{8,044}O_{32}$ ).

Ближние составы нефелиновых включений в сапфирах Бо Флой ранее были опубликованы [Pisutha-Arnond et al., 1999; Saminpanya, 2000]. В целом наблюдаемые в сапфирах Бо Флой включения нефелина имеют химический состав, аналогичный составу нефелина из нефелиновых сиенитов [Deer et al., 1992], который характерен для низкотемпературных полевых шпатов альбит-микроклиновой серии. Кроме того, нефелин является наиболее характерным минералом щелочных пород. Таким образом, эти данные свидетельствуют об образовании сапфира в бедной (недосыщенной) кремнеземом и обогащенной щелочами (Na и K) среде.

Таблица 3. Представительные микрозондовые анализы включений нефелина в сапфирах Бо Флой

| Компонент                      | Бурые сапфиры |        |              |         | Голубые сапфиры |         |
|--------------------------------|---------------|--------|--------------|---------|-----------------|---------|
|                                | темно-серые   |        | светло-серые |         | 3BA3g           | 3BC3a-2 |
|                                | 2A7ia         | 1A3ia  | 3LGC4c-2     | 3LGC12f |                 |         |
| SiO <sub>2</sub> , мас. %      | 42.43         | 42.54  | 43.44        | 42.86   | 42.20           | 40.49   |
| TiO <sub>2</sub>               | н.а.          | н.а.   | 0.03         | 0.08    | 0.05            | н.а.    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 35.80         | 35.32  | 34.36        | 36.06   | 35.94           | 34.48   |
| FeO                            | 0.00          | 1.33   | 0.35         | 0.15    | 0.43            | 4.39    |
| MnO                            | 0.04          | 0.02   | 0.03         | 0.00    | 0.00            | 0.49    |
| MgO                            | 0.02          | 0.02   | 0.00         | 0.00    | 0.04            | 0.05    |
| CaO                            | 2.58          | 2.56   | 0.31         | 0.30    | 0.52            | 0.53    |
| Na <sub>2</sub> O              | 15.66         | 15.17  | 15.53        | 17.88   | 14.17           | 14.68   |
| K <sub>2</sub> O               | 4.54          | 4.52   | 5.61         | 3.54    | 8.10            | 5.48    |
| Сумма                          | 101.06        | 101.49 | 99.65        | 100.88  | 101.44          | 100.57  |
| <b>Формула 32(O)</b>           |               |        |              |         |                 |         |
| Si                             | 8.032         | 8.055  | 8.326        | 8.085   | 8.044           | 7.883   |
| Ti                             | —             | —      | 0.004        | 0.011   | 0.007           | —       |
| Al                             | 7.987         | 7.881  | 7.762        | 8.018   | 8.073           | 7.911   |
| Fe                             | 0.000         | 0.211  | 0.056        | 0.024   | 0.068           | 0.715   |
| Mn                             | 0.006         | 0.003  | 0.006        | 0.000   | 0.001           | 0.080   |
| Mg                             | 0.006         | 0.006  | 0.000        | 0.000   | 0.011           | 0.013   |
| Ca                             | 0.523         | 0.519  | 0.063        | 0.060   | 0.106           | 0.111   |
| Na                             | 5.746         | 5.568  | 5.771        | 6.541   | 5.238           | 5.539   |
| K                              | 1.096         | 1.091  | 1.371        | 0.852   | 1.969           | 1.360   |
| Сумма                          | 23.396        | 23.334 | 23.359       | 23.591  | 23.516          | 23.611  |
| ΣR                             | 7.888         | 7.697  | 7.268        | 7.512   | 7.419           | 7.120   |

Примечание. ΣR = (2Ca + Na + K).

**Шпинель.** Включения шпинели обычно наблюдаются в бурых разновидностях сапфиров. Химический состав шпинели включений (табл. 4) варьирует в узких пределах: 58—60 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 34—36 % FeO и 3—6 % MgO, а содержания остальных компонентов незначительны. На основе этих химических анализов большинство проанализированных образцов шпинели попадает в шпинель-герцинитовую серию. Усредненную химическую формулу шпинели включений можно выразить в виде (Fe<sub>6,343</sub>Mn<sub>0,111</sub>Mg<sub>1,647</sub>Zn<sub>0,008</sub>)(Si<sub>0,002</sub>Ti<sub>0,025</sub>Al<sub>15,635</sub>Cr<sub>0,011</sub>Fe<sub>0,369</sub>)O<sub>32</sub>. Включения герцинитовой шпинели близкого состава были также ранее обнаружены в сапфирах Бо Флой другими исследователями [Saminpanya, Sutherland, 2011]. Однако детальные составы этих включений герцинитовой шпинели отличаются от ранее опубликованных [Guo et al., 1994, 1996] составов, богатых Со шпинелевых включений, найденных в сапфирах Бо Флой.

**Ильменит.** Включения ильменита относительно редки во всех разновидностях сапфиров Бо Флой. Отдельные химические анализы включений ильменита (табл. 4) показывают близкий состав ильменита в темно-бурых и светло-голубых разновидностях сапфиров. Составы включений ильменита варьируют в диапазоне 49—50 % TiO<sub>2</sub>, 35—41 % FeO и 6—10 % MnO со следовыми содержаниями MgO; одно включение ильменита в светло-голубом сапфире (обр. 3LBA2d) показывает относительно низкое содержание TiO<sub>2</sub> (45.73 %), низкое содержание FeO (27.64 %) и повышенное содержание MnO (17.59 %). Усредненную химическую формулу этих включений ильменита можно выразить в виде (Fe<sub>1,36</sub>Mn<sub>0,45</sub>)<sup>2+</sup>Fe<sub>0,19</sub>Ti<sub>1,86</sub><sup>4+</sup>O<sub>3</sub>. Следовательно, замещение Mn<sup>2+</sup> в двухвалентных позициях следует классифицировать как марганецсодержащий ильменит; кроме того, небольшие количества атомов Fe<sup>3+</sup> могут распределяться по двухвалентным и четырехвалентным позициям.

**Пироксен.** Включения пироксенов обнаружены как в бурых, так и в синих разновидностях сапфиров. В целом химические составы этих пироксенов достаточно близки в обеих разновидностях; преобладающими компонентами являются SiO<sub>2</sub> 60—65 % и MgO 31—35 % (табл. 5). Пересчитанные формулы включений пироксена имеют весьма высокие содержания Si и несколько более низкие содержания Mg, хотя они достаточно хорошо согласуются со стехиометрическим составом энстатита. Однако суммы катионов,

Таблица 4. Представительные микронзондовые анализы включений шпинели и ильменита в сапфирах Бо Флой и опубликованный анализ включения шпинели в сапфире Тай

| Компонент                      | Шпинель              |        |              |        | [Saminpanya, Sutherland, 2011] | Ильменит      |          |                 |        |
|--------------------------------|----------------------|--------|--------------|--------|--------------------------------|---------------|----------|-----------------|--------|
|                                | Данная работа        |        |              |        |                                | Данная работа |          |                 |        |
|                                | Бурые сапфиры        |        |              |        |                                | Бурые сапфиры |          | Голубые сапфиры |        |
|                                | темно-серые          |        | светло-серые |        |                                | темно-серые   |          | светло-голубые  |        |
|                                | 1B3ia2-1             | 1B3ia1 | 3LGD4b       | 3LGD4c |                                | 2DGA3c        | 2DGA3c-2 | 3LBA2a-1        | 3LBA2d |
| SiO <sub>2</sub> , мас. %      | 0.03                 | 0.01   | 0.00         | 0.00   | 0.40                           | 0.00          | 0.02     | 0.05            | 0.00   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.07                 | 0.15   | 0.17         | 0.18   | н.а.                           | 49.45         | 49.45    | 49.63           | 45.73  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 59.52                | 59.25  | 58.34        | 58.78  | 56.70                          | 0.46          | 1.30     | 0.76            | 6.90   |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.16                 | 0.00   | 0.02         | 0.07   | 0.80                           | н.а.          | н.а.     | н.а.            | н.а.   |
| FeO                            | 35.39                | 35.98  | 36.14        | 35.19  | 35.30                          | 41.02         | 41.02    | 35.79           | 27.64  |
| MnO                            | 0.22                 | 0.24   | 0.98         | 0.88   | 0.90                           | 6.88          | 6.88     | 10.80           | 17.59  |
| MgO                            | 5.85                 | 5.90   | 4.19         | 3.76   | 6.70                           | 0.69          | 0.69     | 0.53            | 0.98   |
| ZnO                            | 0.14                 | 0.00   | 0.02         | 0.03   | н.а.                           | 0.04          | 0.04     | н.а.            | н.а.   |
| CaO                            | 0.00                 | 0.00   | 0.00         | 0.00   | н.а.                           | 0.00          | 0.00     | 0.00            | 0.00   |
| Сумма                          | 101.36               | 101.53 | 99.85        | 98.89  | 100.80                         | 98.55         | 99.40    | 97.56           | 98.84  |
|                                | <b>Формула 32(O)</b> |        |              |        |                                | <b>6(O)</b>   |          |                 |        |
| Si                             | 0.007                | 0.001  | 0.000        | 0.000  | 0.090                          | 0.000         | 0.001    | 0.003           | 0.000  |
| Ti                             | 0.011                | 0.026  | 0.029        | 0.032  | —                              | 1.917         | 1.893    | 1.931           | 1.713  |
| Al                             | 15.570               | 15.510 | 15.635       | 15.825 | 15.032                         | 0.028         | 0.078    | 0.047           | 0.405  |
| Cr                             | 0.028                | 0.000  | 0.004        | 0.013  | 0.142                          | —             | —        | —               | —      |
| Fe <sup>2+</sup>               | 6.157                | 6.106  | 6.482        | 6.627  | 6.162                          | 1.566         | 1.547    | 1.422           | 0.904  |
| Fe <sup>3+</sup>               | 0.412                | 0.577  | 0.391        | 0.097  | 0.478                          | 0.202         | 0.199    | 0.127           | 0.248  |
| Mn                             | 0.041                | 0.045  | 0.189        | 0.169  | 0.171                          | 0.300         | 0.297    | 0.473           | 0.742  |
| Mg                             | 1.934                | 1.953  | 1.419        | 1.282  | 2.247                          | 0.053         | 0.052    | 0.041           | 0.073  |
| Zn                             | 0.023                | 0.000  | 0.003        | 0.004  | —                              | 0.002         | 0.002    | —               | —      |
| Ca                             | 0.000                | 0.000  | 0.000        | 0.000  | —                              | 0.000         | 0.000    | 0.000           | 0.000  |
| Сумма                          | 24.183               | 24.218 | 24.151       | 24.049 | 24.323                         | 4.069         | 4.067    | 4.043           | 4.084  |
| ΣR <sup>2+</sup>               | 8.155                | 8.105  | 8.093        | 8.083  | 8.581                          | 1.921         | 1.897    | 1.935           | 1.718  |
| ΣR <sup>3+</sup>               | 16.028               | 16.113 | 16.059       | 15.966 | 15.742                         | 2.148         | 2.169    | 2.105           | 2.366  |

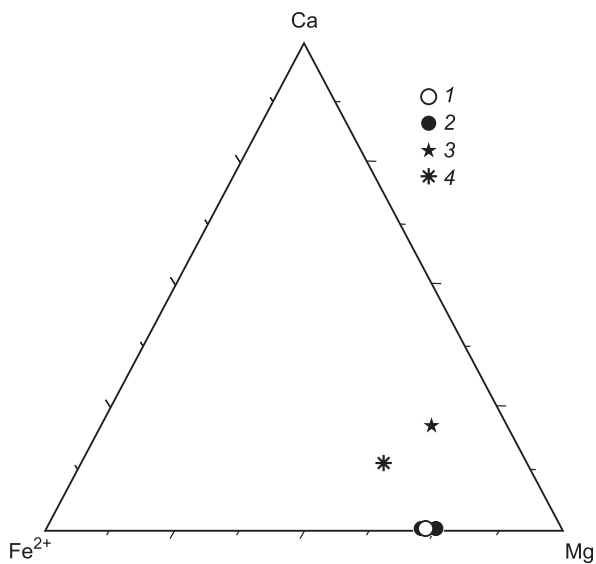
Примечание.  $\Sigma R^{2+} = Fe^{2+} + Mn + Mg + Zn + Ca$ .  $\Sigma R^{3+} = Si + Ti + Al + Cr + Fe^{3+}$ .

рассчитанные на 6 атомов кислорода, во всех анализах ниже 4. Это позволяет предположить наличие вакансий среди катионных позиций. Такие вакансии в катионных позициях могут привести к компенсации зарядов при избытке Si<sup>4+</sup> и замещении Mg<sup>2+</sup> на Al<sup>3+</sup>. Данные табл. 5 показывают, что количество избыточного атомного Si почти равно количеству вакансий, встречающихся в структуре энстатита. Данное исследование показывает, что включение избыточного Si на М-позиции в структуре энстатита компенсируется по зарядам отсутствием атомного Mg<sup>2+</sup>.

Наличие включений энстатита, обогащенного Si, позволяет предположить, что вмещающие их сапфиры могли кристаллизоваться из контаминированных расплавов в зоне контакта между коровым материалом (обогащенным Si и Al) и базальтовой магмой — производной мантии (источник Mg) [Arndt, Goldstein, 1989; Hofmann, 1997; Hawkesworth, Kemp, 2006; Shen et al., 2009].

**Гранат.** Включения граната обычно наблюдаются в бурых разновидностях сапфиров. Их химические составы (табл. 6) варьируют в узких интервалах: 42—43 % SiO<sub>2</sub>, 23—25 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 20—21 % MgO и ~ 13 % FeO. Их атомные соотношения соответствуют серии альмандин—пироп, при этом отмечаются высокие отношения Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>) с вариацией Mg# от 0.72 до 0.73 (более высокие значения соответствуют повышенному содержанию пиропового конечного члена); эти значения сравнимы со значениями Mg# гранатового включения в рубинах Бо Рай (0.87 Mg#) [Saminpanya, Sutherland, 2011] и гранатового ксенокристалла в рубинсодержащем базальте Нонг Бон [Sutthirat et al., 2001; Sutthirat, 2001], последние являются месторождениями рубина, расположенными в Восточном Таиланде вблизи тайландско-камбоджийской границы. Однако включения граната в сапфирах Бо Флой, по-видимому, лишены Са-компонента (рис. 5); составы конечных членов можно представить в виде формулы  $Ru_{72,30-75,45}Alm_{24,50-27,53}$





**Рис. 5.** Тройная диаграмма Ca—Fe<sup>2+</sup>—Mg для включений гранатов в сапфирах Бо Флой; для сравнения также показаны фигуративные точки, построенные по опубликованным данным для ассоциирующих с рубинами гранатов из Восточного Таиланда.

1 — темно-бурые сапфиры, 2 — светло-бурые сапфиры, 3 — включение граната в рубине Бо Рай [Saminpanya, Sutherland, 2011], 4 — ксенокристалл граната в рубинсодержащем базальте Нонг Бон [Sutthirat et al., 2001].

Gro<sub>0.05–0.17</sub>, которая однозначно указывает на мантийное происхождение граната.

**Сапфирин.** Включения сапфирина являются относительно редкими в сапфирах Бо Флой. В данной работе установлено несколько включений сапфирина с подходящими составами (см. табл. 6). Для сравнения в этой таблице приведены также составы

включений сапфиринов, обнаруженных в рубинах Бо На Вонг из Восточного Таиланда [Sutthirat et al., 2001; Sutthirat, 2001; Saminpanya, Sutherland, 2011]. Как видно из табл. 6, включения сапфирина в сапфирах Бо Флой содержат (в пересчете на формульную единицу) 2.07—2.41 Si и 7.68—9.04 Al, при этом они характеризуются узким интервалом значений отношения Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>) (0.98—0.99), они немного выше значений включений сапфирина в корундах Бо На Вонг.

Сапфирин является сравнительно редким минералом и обычно встречается в высокотемпературных и контактно-метаморфизованных, богатых глиноземом и бедных кремнеземом породах [Deer et al., 1992]. Включения сапфирина также известны в рубинах из месторождения Бо Рай [Koivula, 1987] в Восточном Таиланде. Кроме того, в работах [Sutherland, Coenraads, 1996; Sutherland et al., 1998] приводятся данные о сосуществовании сапфирина со шпинелью в розовом сапфире и корунде из базальтовых террейнов Австралии. Эти авторы установили температуру кристаллизации 780—940 °C для агрегатов и температуру протекания реакций с вмещающей магмой более 1000 °C. Таким образом, наличие включений сапфирина может свидетельствовать о том, что некоторые сапфиры Бо Флой могли кристаллизоваться в высокотемпературных условиях регионального или контактового метаморфизма.

**Слюда и ставролит.** Включения слюды и ставролита наблюдаются только в бурых разновидностях сапфиров; однако их пластичность и совершенная спайность приводят к образованию плохо полированной поверхности. Имеется всего несколько приемлемых по качеству анализов, которые приведены в табл. 6. По составу главных компонентов анализы включений слюд попадают в серию биотит—флогопит. В целом слюды биотит-флогопитовой серии образуются в широком интервале температур и давлений; кроме того, они широко распространены во многих контактно- и регионально-метаморфизованных осадочных породах. Среди интрузивных магматических пород они наиболее часто встречаются в гранитах, гранитных пегматитах и нефелиновых сиенитах [Deer et al., 1992].

В данной работе впервые идентифицирован ставролит в виде минеральных включений в сапфирах Бо Флой (см. табл. 6). В общем случае ставролит является характерным минералом метаморфических пород средних—высоких ступеней метаморфизма. Он также является обычным минералом регионально-метаморфизованных глинистых пород средних ступеней метаморфизма и обычно образуется в породах, богатых глиноземом [Deer et al., 1992]. Кроме того, ставролит обнаружен также в сростках с ортопироксеном и шпинелью в Al-Mg ультравысокотемпературных гранулитах [Belyanin et al., 2010]. Таким образом, наличие включений ставролита в сапфирах Бо Флой может свидетельствовать об их возможной кристаллизации в условиях высокотемпературного метаморфизма.

**Циркон.** Включения циркона широко распространены во всех окрашенных разновидностях сапфиров Бо Флой. Их химические составы (табл. 7) варьируют в узких пределах и составляют около 33—34 % SiO<sub>2</sub>, 62—66 % ZrO<sub>2</sub> и 1.37—3.50 % HfO<sub>2</sub>. Включения циркона в голубых сапфирах содержат повышенные содержания Hf по сравнению с включениями циркона в бурых сапфирах, в частности, включения циркона в обр. 3BC9a-1 (до 3.50 % HfO<sub>2</sub>). Однако они имеют достаточно однородный химический состав, что видно из треугольной диаграммы Si—Zr—Hf (рис. 6), и показывают явный рост содержаний Hf во включениях циркона от светло-бурых разновидностей к темно-серым, светло-голубым и синим сапфирам соответственно; кроме того, высокие содержания Hf также фиксируются во включениях циркона в синих сапфирах из месторождения Хуай Сай, Лаос [Sutherland et al., 2002]. Включения цир-

Таблица 6. Представительные микрозондовые анализы включений граната, сапфирина, слюды и ставролита в сафирах Бо Флой и некоторые опубликованные данные для сравнения

| Компонент                      | Гранат      |              | Ксенокристаллы граната         |   | Сапфирин     |         |   | Слюда       |              | Ставролит    |
|--------------------------------|-------------|--------------|--------------------------------|---|--------------|---------|---|-------------|--------------|--------------|
|                                | Бо Флой     |              | Бо Рай                         | Нонг Бон                                | Бо Флой      |         | Бо На Вонг                              | Бо Флой     | Бо Флой      | Бо Флой      |
|                                | Темно-серые | Светло-серые | [Samirapana, Sutherland, 2011] | [Suthirat et al., 2001; Suthirat, 2001] | Светло-серые | Голубые | [Suthirat et al., 2001; Suthirat, 2001] | Темно-серые | Темно-серые  | Светло-серые |
|                                | 2DGB1a      | 3LGD6c-3     | BREP1-GRT1                     | NB-5A                                   | 3LGD6d-2     | 3BB8b-1 | NWEP-9                                  | 1A3a2-1     | 1A3a2-1      | 3LGC9b-1     |
| SiO <sub>2</sub> , мас. %      | 42.07       | 42.80        | 41.90                          | 40.62                                   | 20.87        | 18.32   | 13.79                                   | 13.80       | 36.21        | 28.67        |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.01        | 0.01         | н.а.                           | 0.52                                    | 0.06         | 0.04    | 0.00                                    | н.а.        | 2.83         | 0.00         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25.14       | 23.88        | 23.40                          | 22.48                                   | 56.50        | 67.94   | 62.91                                   | 62.90       | 28.28        | 58.92        |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.04        | 0.04         | н.а.                           | 0.05                                    | 0.00         | 0.00    | 0.24                                    | 0.20        | н.а.         | 0.03         |
| FeO                            | 13.58       | 13.32        | 7.70                           | 14.08                                   | 0.38         | 0.47    | 3.07                                    | 3.10        | 10.18        | 0.31         |
| MnO                            | 0.01        | 0.02         | 0.20                           | 0.37                                    | 0.01         | 0.00    | 0.21                                    | 0.20        | 0.07         | 0.00         |
| MgO                            | 20.00       | 20.68        | 18.20                          | 16.34                                   | 20.95        | 13.30   | 18.99                                   | 19.00       | 13.38        | 12.04        |
| NiO                            | н.а.        | н.а.         | н.а.                           | н.а.                                    | н.а.         | н.а.    | н.а.                                    | 0.50        | н.а.         | н.а.         |
| CaO                            | 0.07        | 0.03         | 8.40                           | 5.35                                    | 0.02         | 0.05    | 0.11                                    | 0.10        | 0.00         | »            |
| Na <sub>2</sub> O              | н.а.        | н.а.         | 0.40                           | н.а.                                    | 0.06         | 0.00    | н.а.                                    | н.а.        | 0.07         | »            |
| K <sub>2</sub> O               | »           | »            | н.а.                           | »                                       | 0.04         | 0.00    | »                                       | »           | 6.34         | »            |
| Сумма                          | 100.94      | 100.78       | 100.20                         | 99.81                                   | 98.89        | 100.12  | 99.32                                   | 99.80       | 97.35        | 99.97        |
|                                |             |              | <b>Формула 24(O)</b>           |   |              |         | <b>20(O)</b>                            |             | <b>24(O)</b> | <b>48(O)</b> |
| Si                             | 5.942       | 6.046        | 5.975                          | 5.944                                   | 2.407        | 2.069   | 1.620                                   | 1.618       | 5.456        | 7.657        |
| Ti                             | 0.001       | 0.001        | —                              | 0.057                                   | 0.005        | 0.004   | 0.000                                   | —           | 0.320        | 0.000        |
| Al                             | 4.185       | 3.975        | 3.933                          | 3.877                                   | 7.682        | 9.043   | 8.710                                   | 8.689       | 5.021        | 18.544       |
| Cr                             | 0.005       | 0.004        | —                              | 0.006                                   | 0.000        | 0.000   | 0.022                                   | 0.019       | —            | 0.005        |
| Fe <sup>2+</sup>               | 1.604       | 1.573        | 0.580                          | 1.553                                   | 0.036        | 0.044   | 0.261                                   | 0.222       | 0.309        | 0.069        |
| Fe <sup>3+</sup>               | 0.000       | 0.000        | 0.339                          | 0.170                                   | 0.000        | 0.000   | 0.040                                   | 0.082       | 0.974        | 0.000        |
| Mn                             | 0.002       | 0.003        | 0.024                          | 0.046                                   | 0.001        | 0.000   | 0.021                                   | 0.020       | 0.009        | 0.000        |
| Mg                             | 4.212       | 4.356        | 3.869                          | 3.565                                   | 3.604        | 2.239   | 3.326                                   | 3.320       | 3.005        | 4.793        |
| Ni                             | —           | —            | —                              | —                                       | —            | —       | —                                       | 0.047       | —            | —            |
| Ca                             | 0.010       | 0.005        | 1.283                          | 0.839                                   | 0.003        | 0.006   | 0.014                                   | 0.013       | 0.000        | —            |
| Na                             | —           | —            | 0.111                          | —                                       | 0.012        | 0.000   | —                                       | —           | 0.019        | —            |
| K                              | —           | —            | —                              | —                                       | 0.006        | 0.000   | —                                       | —           | 1.218        | —            |
| Сумма                          | 15.962      | 15.963       | 16.114                         | 16.057                                  | 13.757       | 13.406  | 14.014                                  | 14.029      | 16.331       | 31.068       |
| ΣR <sup>2+</sup>               | 1.616       | 1.581        | 1.887                          | 2.437                                   | 0.040        | 0.050   | 0.296                                   | 0.302       | —            | —            |
| ΣR <sup>3+</sup>               | 4.191       | 3.980        | 4.271                          | 4.110                                   | 7.687        | 9.047   | 8.772                                   | 8.789       | —            | —            |
| Mg/(Mg + Fe <sup>2+</sup> )    | 0.72        | 0.73         | 0.87                           | 0.70                                    | 0.99         | 0.98    | 0.93                                    | 0.94        | —            | —            |

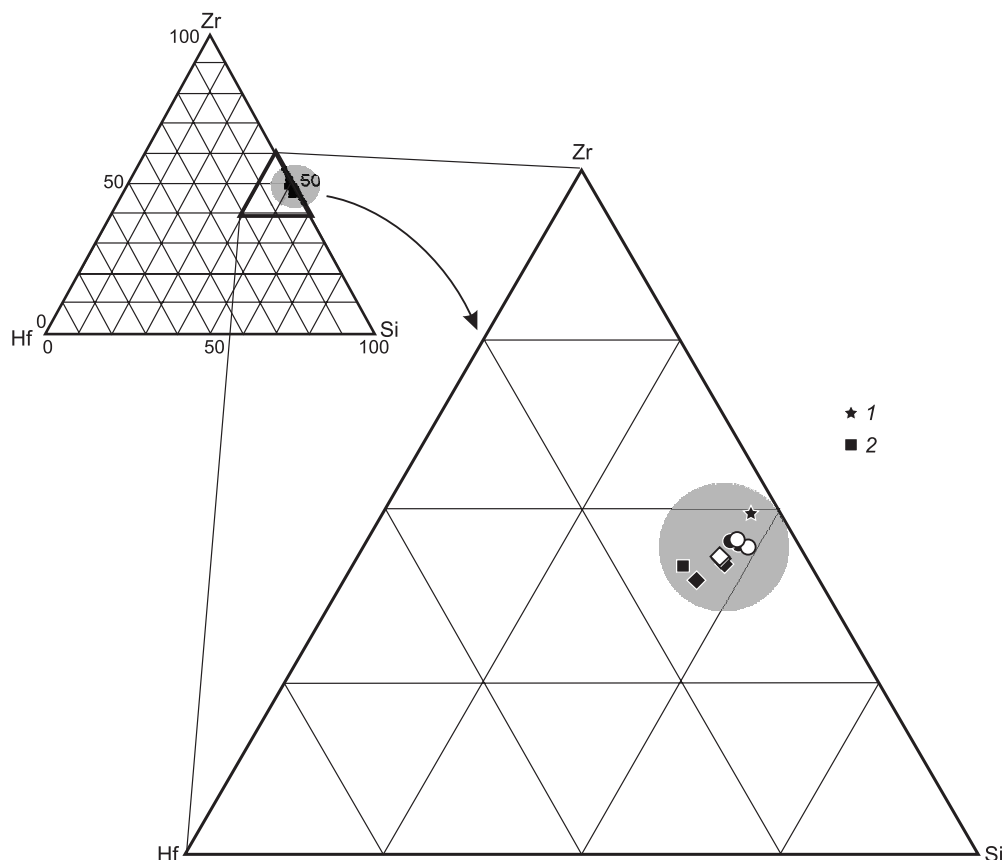
Примечание.  $\Sigma R^{2+} = Fe^{2+} + Mn + Mg + Ca$ .  $\Sigma R^{3+} = Ti + Al + Cr + Fe^{3+}$ .

Таблица 7. Представительные микрозондовые анализы включений циркона в сапфирах Бо Флой и некоторые опубликованные данные для сравнения

| Компонент                      | Бо Флой       |             |              |        |                 |        |                |        | Аллювиальный циркон Бо Флой | Бан Хуай Сай              |
|--------------------------------|---------------|-------------|--------------|--------|-----------------|--------|----------------|--------|-----------------------------|---------------------------|
|                                | Бурые сапфиры |             |              |        | Голубые сапфиры |        |                |        | [Sutthirat, 2001]           | [Sutherland et al., 2002] |
|                                | темно-серые   |             | светло-серые |        | голубые         |        | светло-голубые |        |                             |                           |
|                                | 1B3ib2        | 2DGC6a-REE2 | 3LGC1c-1     | 3LGC1d | 3BC9a-1         | 3BC13a | 3LBA7a         | 3LBC9a | KBPZ1-1                     | 85N                       |
| SiO <sub>2</sub> , мас. %      | 33.08         | 32.49       | 34.22        | 33.08  | 34.14           | 34.44  | 34.10          | 33.83  | 31.57                       | 31.23                     |
| ZrO <sub>2</sub>               | 64.65         | 65.57       | 64.04        | 66.18  | 62.40           | 63.36  | 64.91          | 65.13  | 68.42                       | 64.02                     |
| HfO <sub>2</sub>               | 1.62          | 1.75        | 1.37         | 1.59   | 3.50            | 2.40   | 2.39           | 2.33   | 0.81                        | 3.58                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.12          | 0.01        | 0.00         | 0.02   | 0.17            | 0.05   | 0.10           | 0.02   | 0.00                        | 0.01                      |
| CaO                            | 0.01          | 0.00        | 0.02         | 0.01   | 0.00            | 0.02   | 0.02           | 0.00   | 0.00                        | н.а.                      |
| FeO                            | 0.06          | 0.06        | 0.03         | 0.00   | 0.04            | 0.06   | 0.02           | 0.05   | 0.00                        | 0.06                      |
| Сумма                          | 99.54         | 99.87       | 99.68        | 100.87 | 100.25          | 100.33 | 101.54         | 101.35 | 100.80                      | 98.90                     |
| <b>Формула 4(O)</b>            |               |             |              |        |                 |        |                |        |                             |                           |
| Si                             | 1.013         | 0.998       | 1.038        | 1.004  | 1.036           | 1.040  | 1.023          | 1.019  | 0.968                       | 0.981                     |
| Zr                             | 0.966         | 0.982       | 0.947        | 0.979  | 0.923           | 0.933  | 0.949          | 0.956  | 1.023                       | 0.980                     |
| Hf                             | 0.017         | 0.018       | 0.014        | 0.016  | 0.036           | 0.025  | 0.024          | 0.024  | 0.008                       | 0.038                     |
| Al                             | 0.004         | 0.000       | 0.000        | 0.001  | 0.006           | 0.002  | 0.004          | 0.001  | 0.000                       | 0.000                     |
| Ca                             | 0.000         | 0.000       | 0.001        | 0.000  | 0.000           | 0.001  | 0.001          | 0.000  | 0.000                       | —                         |
| Fe                             | 0.002         | 0.001       | 0.001        | 0.000  | 0.001           | 0.002  | 0.001          | 0.001  | 0.000                       | 0.002                     |
| Сумма                          | 2.002         | 2.001       | 2.001        | 2.000  | 2.002           | 2.002  | 2.001          | 2.001  | 2.000                       | 2.001                     |
| Si, ат. %                      | 50.8          | 49.9        | 51.9         | 50.2   | 51.9            | 52.1   | 51.2           | 51.0   | 48.4                        | 49.1                      |
| Zr                             | 48.4          | 49.1        | 47.4         | 49.0   | 46.3            | 46.7   | 47.6           | 47.8   | 51.2                        | 49.0                      |
| Hf                             | 0.8           | 0.9         | 0.7          | 0.8    | 1.8             | 1.2    | 1.2            | 1.2    | 0.4                         | 1.9                       |

кона в сапфирах Бо Флой, очевидно, имеют более высокие содержания HfO<sub>2</sub> по сравнению с аллювиальными цирконами Бо Флой [Sutthirat, 2001], что позволяет предположить разное происхождение источников цирконов обоих типов. Варк и Миллер [Wark, Miller, 1993] считают, что содержание Hf в цирконе может грубо отражать степень дифференциации материнского расплава; в силу этого высокие содержания Hf во включениях циркона в сапфирах Бо Флой могут свидетельствовать о длительной эволюции исходного материала, из которого образовался вмещающий сапфир.

В данной работе для анализа содержаний редких и редкоземельных элементов (REE) было выбрано подходящее включение циркона (обр. 1B3ib2), наблюдаемое в образце темно-бурого сапфира, поскольку это включение имеет правильную овальную форму, большой размер (~ 200 мкм) и в нем отсутствуют трещины (см. рис. 3, e). Для анализа редких элементов во включениях циркона в данной работе использовался метод LA-ICP-MS. Содержания REE из включения циркона нормированы на их содержания в хондрите [Taylor, McLennan, 1985] и вынесены на график вместе с содержаниями REE из цирконов пород различных типов [Belousova et al., 2002] (рис. 7). Кроме того, на том же рисунке для сравнения показаны редкоэлементные анализы циркона из ассоциации циркон + сапфир + нефелин + герцинитовая шпинель и циркона из галечника «Corsilzirspite» (необычная порода, состоящая из корунда, силлиманита, циркона и шпинели), обнаруженного в аллювиальном сапфиросном слое месторождения Бо Флой. Нормированные по хондриту значения REE для цирконового включения Бо Флой оказались близкими к таким значениям для цирконов из вышеуказанной ассоциации и цирконов из гальки «Corsilzirspite». К тому же все линии, построенные для цирконов Бо Флой, показывают положительную Ce-аномалию, отрицательную Eu-аномалию и быстрый подъем в направлении тяжелых REE, и близко соответствуют кривым цирконов из сиенит-пегматитов. Это позволяет предположить, что цирконы Бо Флой могли кристаллизоваться из относительно дифференцированного и окисленного расплава, например, гранитоидного или сиенит-пегматитового расплава, в котором большая часть Eu должна находиться в двухвалентном состоянии. Кроме того, эти хондрит-нормированные кривые REE для цирконов Бо Флой хорошо согласуются с REE-кривой для циркона типа 4 (см. рис. 7), опубликованной в [Nemchin et al., 2010]. Эти авторы предполагают, что такой циркон может ассоциировать с неким фель-



**Рис. 6.** Тройная диаграмма Si—Zr—Hf для включений циркона в сапфирах Бо Флой и аллювиального циркона [Sutthirat, 2001] из того же месторождения, а также для включения циркона из сапфира Бан Хуай Сай, Лаос [Sutherland et al., 2002].

*1* — аллювиальный циркон в сапфире Бо Флой [Sutthirat, 2001], *2* — включение циркона в сапфире Бан Хуай Сай [Sutherland et al., 2002]. Остальные усл. обозн. см. на рис. 4.

зитовым и гранитным источником, представляющим очень позднюю стадию дифференциации примитивной мафической магмы.

**Включения других минералов.** Помимо описанных выше, в исследованных образцах сапфиров были идентифицированы и другие минеральные включения, например, включения монацита и кальцита. Включения монацита были описаны также в сапфирах из базальтов, например, из района Циангугу в ЮЗ Руанде [Krzemnicki et al., 1996], Таиланда и Камбоджи [Intasopa et al., 1998] и месторождения Хуай Сай в Лаосе [Singbamroong, Thanasuthipitak, 2004]; однако все эти работы базировались на применении метода рамановской спектроскопии. Монацит обычно встречается в виде редкого акцессорного минерала в гранитах, сиенитах и гранитных пегматитах, сильно обогащенных Ce, La и Nd [Deer et al., 1992]. Кальцит также обнаружен в виде минеральных включений в сапфирах Бо Флой. Как указывалось выше, включения кальцита в сапфирах Бо Флой были ранее описаны Писуттой-Арнондом с соавторами (устное сообщение). Кальцит может встречаться в некоторых щелочных магматических породах, особенно в нефелиновых сиенитах [Deer et al., 1992]. Поэтому находки включений кальцита в данной работе могут свидетельствовать в пользу нефелин-сиенитового происхождения сапфиров Бо Флой.

## ОБСУЖДЕНИЕ

В данном исследовании было выявлено большое разнообразие минеральных включений в сапфирах Бо Флой. Среди минеральных включений установлены щелочной полевой шпат, нефелин, герцининовая разность шпинели, циркон, марганецсодержащий ильменит, богатый кремнеземом энстатит, гранат альмандин-пироповой группы, монацит, кальцит, сапфирин, биотит-флогопитовая слюда и ставролит. Большая часть этих включений вошла в состав вмещающих сапфиров, по-видимому, во время образования последних, поскольку включения имеют равновесные взаимные контакты с вмещающими

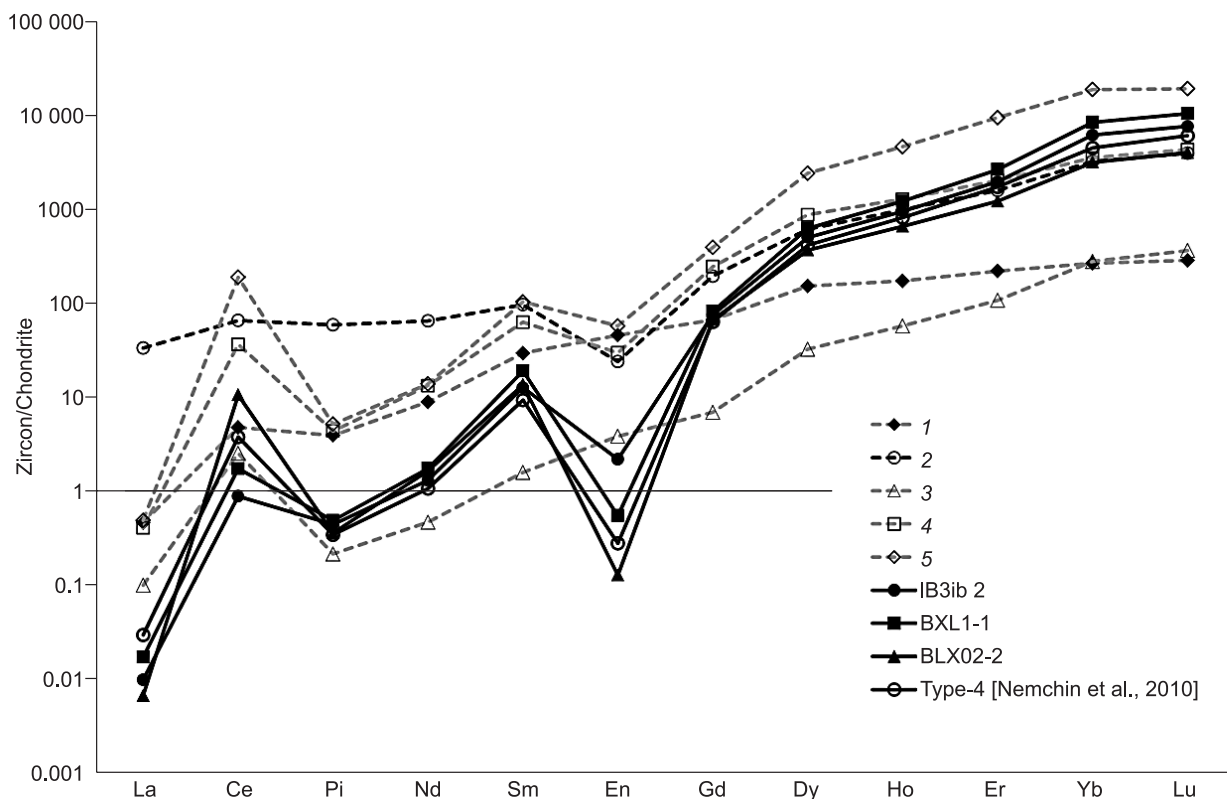


Рис. 7. Нормированные по хондриту графики REE для включения циркона (обр. 1B3ib2, залитые кружки), а также циркона из ассоциации циркон + сапфир + нефелин + герцинитовая разность шпинели (обр. BLX02-2, залитые треугольники) и циркона из гальки «Corsilzirspite» (обр. BXL1-1, залитые квадраты), все с месторождения Бо Флой. Для сравнения приведены графики REE для цирконов из различных пород (данные из работ [Belousova et al., 2002; Nemchin et al., 2010]).

1 — карбонатит, 2 — гранитоид, 3 — сиенит, 4 — сиенитовый пегматит, 5 — нефелин-сиенитовый пегматит.

сапфирами без видимых реакционных каемок или резорбированных контуров (см. рис. 3). Следовательно, они должны нести ценную информацию о химической обстановке, физических условиях и геологических процессах, происходивших в ходе ранней кристаллизации вмещающих сапфиров до того, как последние были вынесены на поверхность во время излияний базальтов. Среди минеральных включений преобладающими являются включения щелочного полевого шпата, циркона и нефелина, тогда как включения богатого кремнеземом энстатита, герцинитовой шпинели, марганецсодержащего ильменита, монацита, альмандин-пиропового граната, сапфирина, биотит-флогопитовой слюды, ставролита и кальцита встречаются редко. По геохимическим характеристикам такие минеральные включения можно разделить на две серии, а именно включения, связанные с щелочной магмой, и включения, связанные с метаморфизмом. Каждая группа включений может дать информацию о материнских породах, которые связаны с происхождением вмещающих эти включения сапфиров.

Серия включений, связанных с щелочной магмой, содержит полевые шпаты, нефелин, циркон, марганецсодержащий ильменит, монацит и, вероятно, кальцит, которые, по-видимому, являются минеральными фазами, кристаллизовавшимися из щелочной фельзитовой магмы. Состав включений щелочного полевого шпата изменяется от богатой Na (альбитовой) разности в бурых разновидностях сапфиров до более богатой K разности в голубых разновидностях сапфиров. Очевидно, эта изменчивость состава согласуется с составом нефелиновых включений, в которых богатый Na нефелин обнаружен в бурой разновидности сапфиров, в то время как несколько более обогащенный K нефелин встречается только в голубой разновидности сапфиров. Фактически, оба эти минерала известны как типичные составляющие нефелиновых сиенитов [Deer et al., 1992; Wilkinson, Hensel, 1994].

Помимо включений полевого шпата и нефелина, химический состав циркона в изученных включениях также свидетельствует о связи образования сапфиров Бо Флой с сильно дифференцированными фельзитовыми расплавами. Кроме того, нормированные по хондриту графики REE для этих включений

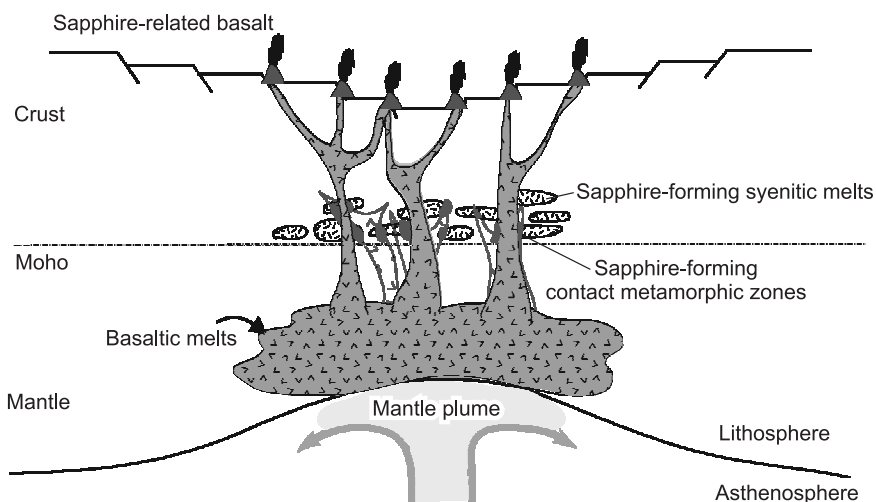
циркона также показывают характерные соотношения положительной Ce-аномалии и обеднение Eu, близкие к графикам REE цирконов из сиенит-пегматитов [Belousova et al., 2002]. При этом марганецосодержащий ильменит обычно встречается в гранитных магматических породах, а также в некоторых карбонатитах, которые могут содержать аномальное количество ниобия [Deer et al., 1992]. Таким образом, наличие марганецсодержащих (без аномального Nb) ильменитовых включений в сапфирах Бо Флой, особенно в их синих разновидностях, также поддерживает гипотезу происхождения сапфиров из фельзитового расплава. Кроме того, присутствие включений монацита (а также включений оксида Nb, по [Pisutha-Arnond et al., 1999]) в этих сапфирах также свидетельствует в пользу модели сильно эволюционировавшего расплава, поскольку эти минералы являются обычными аксессуарами в фельзитовых породах. На основании широкого распространения минеральных включений этой серии можно предположить, что большинство сапфиров месторождения Бо Флой, по-видимому, кристаллизовалось из сильно дифференцированного, богатого щелочами и бедного кремнеземом расплава типа сиенитовой магмы.

Сиенитовое происхождение хорошо согласуется с генетической моделью сапфиров Бо Флой и других сапфиров в базальтах, предложенной предыдущими исследователями. Например, Саминпанья [Samirpanya, 2000] предложил модель нефелин-сиенитового происхождения сапфиров Бо Флой, основываясь на находках в сапфирах включений нефелина. Помимо этого, Гуо [Guo et al., 1996] описал включения ильменита, а также полевого шпата, циркона, уранинита и сульфидов Fe и Cu в обычных сапфирах базальтов и связал происхождение этих сапфиров с гранитным или сиенитовым расплавом. Эти факты хорошо согласуются с ранее предложенными для обычных сапфиров базальтов генетическими моделями, связанными с фельзитовыми, а не с базитовыми расплавами [Coenraads et al., 1990, 1995; Sutherland, Schwarz, 2001; Izokh et al., 2010], а скорее всего, сиенитовыми расплавами, образовавшимися в пределах верхней мантии—нижней коры [Aspen et al., 1990; Upton et al., 1999].

Серия включений в сапфирах Бо Флой, связанных с метаморфическими процессами, содержит богатый кремнеземом энстатит, гранат альмандин-пиропового ряда, сапфирин, ставролит, слюду биотит-флогопитового ряда и, возможно, герцинитовую разность шпинели. Хотя включения метаморфического происхождения встречаются сравнительно редко в сапфирах Бо Флой, их присутствие особенно примечательно, поскольку большинство минеральных фаз этих включений (кроме герцинитовой разности шпинели) никогда прежде не фиксировались в виде включений в сапфирах Бо Флой из базальтов. Эти минеральные включения дополнительно предоставляют веские свидетельства в пользу ранее предложенной генетической модели сапфиров Бо Флой, связанной с контактово-метаморфическим взаимодействием базальтовой магмы и коровых пород.

Присутствие богатых кремнеземом энстатитовых включений в сапфирах Бо Флой может являться неоспоримым свидетельством протекания гибридной метасоматической реакции между базальтовой магмой и коровым материалом (напр., щелочными фельзитовыми породами или другими коровыми породами), поскольку их состав в значительной степени определяется составом исходных пород обоих типов. Кроме того, обогащенный кремнеземом энстатит также имеет достаточно высокие содержания Al, вероятно, привнесенные из корового источника. Следовательно, обогащенный Si энстатит может кристаллизоваться как результат реакции контаминации в зоне контактового метаморфизма между мафическим дериватом мантии и коровыми породами, обогащенными кремнеземом и глиноземом. Кроме того, встречаемость во включениях граната ряда альмандин—пироп с обогащенным пиропом конечным членом также свидетельствует о глубинном мантийном или нижнекоровом источнике материала.

Присутствие сапфирина, ставролита, слюды биотит-флогопитового ряда во включениях сапфиров Бо Флой дополнительно свидетельствует о контактово-метаморфической среде образования вмещающих сапфиров. Даже с учетом того, что герцинитовая разность шпинели может встречаться как в метаморфических, так и в магматических породах [Deer et al., 1992], находки включений герцинитовой шпинели в сапфирах Бо Флой, составы которой близки составам герцинитовой шпинели из гальки «Corsilzirspite» (необычная ассоциация корунд + силлиманит + циркон + герцинитовая шпинель) [Pisutha-Arnond et al., 1999, 2005] указывают (по крайней мере, некоторые из них) на контактово-метаморфическое происхождение богатой глиноземом коровой породы. Эти находки позволяют предположить, что сапфиры Бо Флой могли также кристаллизоваться в результате метасоматических реакций и из контаминированного расплава поднимающейся из мантии к поверхности базальтовой магмы с коровыми породами. При таких условиях контактового метасоматоза могла происходить десицификация корового материала. В результате непосредственно в контактовой зоне метасоматизированных пород и контаминированного расплава или вблизи нее могли кристаллизоваться сапфиры совместно в включениях этих метаморфических минералов. Связанное с метаморфизмом происхождение сапфиров Бо Флой также хорошо согласуется с метаморфической (метасоматической) контаминированной габброидной моделью, предложенной ранее [Pisutha-Arnond et al., 1999, 2005] и основанной на находке галек «Corsilzirspite» в сапфиросном слое галечника в рудном поле Бо Флой.



**Рис. 8. Бимодальная генетическая модель образования сапфиров Бо Флой, включающая происхождение, связанное с сиенитовым расплавом и с контактовым метаморфизмом.**

Опираясь на вышеприведенные данные и обсуждение, можно обоснованно предложить бимодальную генетическую модель образования сапфиров Бо Флой: 1) как связанное с сиенитовым расплавом происхождение, когда сапфиры могли кристаллизоваться из сильно дифференцированных расплавов щелочного фельзитового состава, образующихся при начальных стадиях парциального плавления мафитового корового материала и 2) как связанное с контактовым метаморфизмом происхождение, при котором сапфиры могли образоваться из метасоматизированных коровых пород и контаминированного расплава в контактовой зоне интрузии базальтов. Эта модель согласуется с выводами Пёката [Peucat et al., 2007], который установил, что редкоэлементные характеристики сапфиров Бо Флой перекрывают поля как магматических, так и метаморфических пород. Иллюстрацией бимодальной генетической модели образования сапфиров Бо Флой может быть рис. 8. Согласно модели, как базальтовый, так и фельзитовый щелочные расплавы генерируются в результате декомпрессионного спада давления. В районе месторождения Бо Флой, а также во всем регионе ЮВ Азии на ранней стадии могло развиваться рифтообразование и уменьшение мощности литосферы, что привело к невероятному сбросу литостатического давления. При этом имело место растяжение горячей астеносферы. В дальнейшем в результате апвеллинга астеносферы в верхнюю мантию в ходе растяжения коры под этим регионом могла образоваться базальтовая магма. В этот же период во время начальных стадий парциального плавления мафического слоя в нижней коре в результате утонения коры и/или влияния мантийного плюма также мог образоваться фельзитовый щелочной расплав (т.е. сиенитовый расплав). Следовательно, сапфиры Бо Флой могли кристаллизоваться из таких ранних сиенитовых расплавов, при этом расплавы вскоре после этого начали медленно остывать. Позже образовались обширные области фельзитовых щелочных и базальтовых расплавов, которые затем вызвали подъем базальтовых расплавов из верхней мантии с образованием контактовых зон с породами нижней коры над областью проявления мантийного плюма на этой территории. Сапфиры, связанные с сиенитовыми расплавами, продолжали эпизодически кристаллизоваться, при этом интрузии верхнемантийных базальтов в нижнюю кору могли привести к дополнительному образованию так называемых «связанных с контактовым метаморфизмом сапфиров» в контактовой зоне и из контаминированных расплавов. Это убедительно подтверждается находками галек «Corsilzirspite» в разрезе залежи Бо Флой (устное сообщение V. Pisutha-Arnond), которые могут представлять типичные контактово-метаморфические сапфиры. Позже щелочная базальтовая магма поднималась из глубинной мантии и выносила мантийные ксенолиты (напр., ксенолиты шпинелевых лерцолитов, описанные [Sutthirat et al., 1999, 2001; Sutthirat, 2001; Srithai, 2005]), ксенокристаллы (напр., плеонастической шпинели, диопсида, богатого Al и Ti магнетита, циркона, описанные [Pisutha-Arnond et al., 1999; Saminpanya, Sutherland, 2008]), ксенолиты коровых пород с сапфирами, кристаллизовавшиеся из фельзитовых щелочных расплавов и в контактово-метаморфических зонах, образовавшихся ранее и в ходе подъема магмы на поверхность.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детальное изучение химизма минеральных включений в сапфирах Бо Флой выявило две серии уникальных минеральных включений, соответствующих специфическому происхождению вмещающих

их сапфиров. Минеральные включения, обнаруженные в сапфирах Бо Флой, демонстрируют широкий спектр минеральных фаз, среди которых установлены щелочной полевошпатовый нефелин, герцинитовая разность шпинели, циркон, марганецсодержащий ильменит, богатый кремнеземом энстатит, гранат альмандин-пироповой группы, монацит, кальцит, сапфирин, биотит-флогопитовая слюда и ставролит. Изучение редкоэлементного состава представительного включения циркона в сапфире месторождения Бо Флой выявило характерную положительную Се-аномалию и обеднение Eu на графике нормированных по хондриту содержаний REE, которые убедительно показывают, что циркон этого включения кристаллизовался из сиенитовой магмы. На основе химизма минеральных включений этих сапфиров установлено, что включения принадлежат к двум различным минеральным группам, а именно к фельзитовой щелочной серии и к контактово-метаморфической серии, и образовались в существенно разных физико-химических обстановках. На основе этих данных предложена «бимодальная генетическая модель» образования сапфиров месторождения Бо Флой; одна группа данных относится к «происхождению, связанному с сиенитовым расплавом», а другая — к «контактово-метаморфическому происхождению».

Данная работа выполнена на факультете геологии, кафедра естественных наук Университета Чулалонкорн. Автор хотел бы выразить благодарность Институту драгоценных и ювелирных камней Таиланда (государственная организация) за возможность пользования оборудованием и сложной лабораторной аппаратурой. Анализ редких элементов и U-Pb датирование включений циркона выполнила д-р Е. Белоусова, работающая на факультете наук о Земле и планетах, Университет Маккуори, Сидней, которой авторы выражают свою искреннюю признательность.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Arndt N.T., Goldstein S.L.** An open boundary between lower continental crust and mantle: its role in crust formation and crustal recycling // *Tectonophysics*, 1989, v. 161, p. 201—212.

**Aspen P., Upton B.G.J., Dickin A.P.** Anorthoclase, sanidine and associated megacrysts in Scottish alkali basalts; high-pressure syenitic debris from upper mantle sources? // *Eur. J. Miner.*, 1990, v. 2, p. 503—517.

**Barr S.M., Macdonald A.S.** Geochemistry and petrogenesis of Late Cenozoic alkaline basalts of Thailand // *Geol. Soc. Malaysia Bull.*, 1978, v. 10, p. 21—48.

**Barr S.M., Macdonald A.S.** Geochemistry and geochronology of late Cenozoic basalts of Southeast Asia // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1981, v. 92, p. 508—512.

**Belousova E.B., Griffin W.G., O'Reilly S., Fisher N.F.** Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type // *Contr. Miner. Petrol.*, 2002, v. 143, p. 602—622.

**Belyanin G.A., Rajesh H.M., Van R.D.D., Mouri H.** Corundum + orthopyroxene ± spinel intergrowths in an ultrahigh-temperature Al-Mg granulite from the Southern Marginal Zone, Limpopo Belt, South Africa // *Amer. Miner.*, 2010, v. 95, p. 196—199.

**Coenraads R.R., Sutherland F.L., Kinny P.D.** The origin of sapphires; U-Pb dating of zircon inclusions sheds new light // *Miner. Mag.*, 1990, v. 54, p. 113—122.

**Coenraads R.R., Vichit P., Sutherland F.L.** An unusual sapphire-zircon-magnetite xenolith from the Chanthaburi gem province, Thailand // *Miner. Mag.*, 1995, v. 59, p. 465—479.

**Deer W.A., Howie R.A., Zussman J.** An introduction to the rock-forming minerals // Longman Scientific & Technical, Essex, UK, 1992.

**Droop G.T.R.** A general equation for estimating Fe<sup>3+</sup> concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria // *Miner. Mag.*, 1987, v. 51, p. 431—435.

**Guo J., Griffin W.L., O'Reilly S.Y.** A cobalt-rich spinel inclusion in a sapphire from Bo Ploi, Thailand // *Miner. Mag.*, 1994, v. 58, p. 247—258.

**Guo J., O'Reilly S.Y., Griffin W.L.** Corundum from basaltic terrains: a mineral inclusion approach to the enigma // *Contrib. Miner. Petrol.*, 1996, v. 122, p. 368—386.

**Hansawek R., Pattamalai K.** Kanchanaburi sapphire deposits. Proceedings of the International conference on stratigraphy and tectonic evolution of Southeast Asia and the South Pacific, Bangkok, 1997, 717 p.

**Hawkesworth C.J., Kemp A.I.S.** Evolution of the continental crust // *Nature*, 2006, v. 443, p. 811—817.

**Hofmann A.W.** Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism // *Nature*, 1997, v. 385, p. 219—229.

**Intasopa S., Atichat W., Pisutha-Arnond V.** Inclusions in corundum: a new approach to the definition of standards for origin determination, science and technology for gem and jewelry industry (in Thai). Thailand Research Fund. 1998.

**Izokh A.E., Smirnov S.Z., Egorova V.V., Anh T.T., Kovyazin S.V., Phuong N.T., Kalinina V.V.** The conditions of formation of sapphire and zircon in the areas of alkali-basaltoid volcanism in Central Vietnam // *Rus. Geol. Geoph.*, 2010, v. 51, p. 719—733.



- Koivula J.I.** Sapphirine (not sapphire) in a ruby from Bo Rai, Thailand // *J. Gemmol.*, 1987, v. 20 (6), p. 369—370.
- Krzemnicki M.S., Hanni H.A., Guggenheim R., Mathys D.** Investigations on sapphires from an alkali basalt, South West Rwanda // *J. Gemmol.*, 1996, v. 25 (2), p. 90—106.
- Nemchin A.A., Grange M.L., Pidgeon R.T.** Distribution of rare earth elements in lunar zircon // *Amer. Miner.*, 2010, v. 95, p. 273—283.
- Peucat J.J., Ruffault P., Fritsch E., Bouhnik-Le Coz M., Simonet C., Lasnier B.** Ga/Mg ratio as a new geochemical tool to differentiate magmatic from metamorphic blue sapphires // *Lithos*, 2007, v. 98, p. 261—274.
- Pisutha-Arnond V., Wathanakul P., Intasopa S.** New evidence on the origin of Kanchanaburi sapphire, Final Report submitted to The Thailand Research Fund (TRF) (in Thai). 1999.
- Pisutha-Arnond V., Intasopa S., Wathanakul P., Griffin W.L., Atichat W., Sutthirat C.** Sapphire xenocrysts in basalt from the Bo Phloi Gem Field, Western Thailand // *Proceedings of the International conference on GEOINDO 2005*, Khon Kaen, 2005, p. 338—344.
- Saminpanya S.** Mineralogy and origin of gem corundum associated with basalt in Thailand. Dissertation. The University of Manchester, United Kingdom. 2000.
- Saminpanya S., Sutherland F.L.** Black opaque gem minerals associated with corundum in the alluvial deposits of Thailand // *Aust. Gemmol.*, 2008, v. 23 (6), p. 242—253.
- Saminpanya S., Sutherland F.L.** Different origins of Thai area sapphire and ruby, derived from mineral inclusions and co-existing minerals // *Eur. J. Miner.*, 2011, v. 23, p. 683—694.
- Shen B., Jacobsen B., Lee C.-T.A., Yin Q.-Z., Morton D.M.** The Mg isotopic systematics of granitoids in continental arcs and implications for the role of chemical weathering in crust formation // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, p. 20652—20657.
- Singbamroong S., Thanasuthipitak T.** Study of solid mineral inclusions in sapphires from Ban Huai Sai area, Laos, by Raman spectroscopy. *Chiang Mai J. Sci.*, 2004, v. 31 (3), p. 251—263.
- Srithai B.** Petrography and mineral chemistry of ultramafic xenoliths from Bo Ploi basalt, Kanchanaburi, Thailand // *Proceedings of International conference on geology, geotechnology and mineral resources of Indochina*, Khon Kaen, 2005, p. 358—364.
- Sutherland F.L., Coenraads R.R.** An unusual ruby-sapphire-sapphirine-spinel assemblage from the Tertiary Barrington volcanic province, New South Wales, Australia // *Miner. Mag.*, 1996, v. 60, p. 623—638.
- Sutherland F.L., Schwarz D.** Origin of gem corundums from basaltic fields // *Austral. Gemmol.*, 2001, v. 21 (1), p. 30—33.
- Sutherland F.L., Hoskin P.W.O., Fanning C.M., Coenraads R.R.** Models of corundum origin from alkali basaltic terrains: a reappraisal // *Contrib. Miner. Petrol.*, 1998, v. 133, p. 356—372.
- Sutherland F.L., Bosshart G., Fanning C.M., Hoskin P.W.O., Coenraads R.R.** Sapphire crystallization, age and origin, Ban Huai Sai, Laos: age based on zircon inclusions // *J. Asian Earth Sci.*, 2002, v. 20, p. 841—849.
- Sutthirat C.** Petrogenesis of mantle and crustal xenoliths and xenocrysts in basaltic rocks associated with corundum deposits in Thailand. Dissertation. The University of Manchester, United Kingdom. 2001.
- Sutthirat C., Charusiri P., Farrar E., Clark A.H.** New  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology and characteristic of some Cenozoic basalt in Thailand // *Proceedings of International symposium on stratigraphic correlation of Southeast Asia*, Bangkok, 1994, p. 306—321.
- Sutthirat C., Droop G.T.R., Henderson C.M.B., Manning D.A.C.** Petrography and mineral chemistry of xenoliths and xenocrysts in Thai corundum-related basalts: implications for the upper mantle and lower crust beneath Thailand // *Symposium on mineral, energy, and water resources of Thailand*, Bangkok, 1999, p. 152—161.
- Sutthirat C., Saminpanya S., Droop G.T.R., Henderson C.M.B., Manning D.A.C.** Clinopyroxene-corundum assemblages from alkali basalt and alluvium, eastern Thailand: constraints on the origin of Thai rubies // *Miner. Mag.*, 2001, v. 65, p. 277—295.
- Taylor S.R., McLennan S.M.** The continental crust: its composition and evolution // Blackwell Sci., Oxford, 1985.
- Upton B.G.J., Hinton R.W., Aspen P., Finch A., Valley J.W.** Megacrysts and associated xenoliths: evidence for migration of geochemically enriched melts in the upper mantle beneath Scotland // *J. Petrol.*, 1999, v. 40, p. 935—956.
- Vichit P., Vudhichatvanich S., Hansawek R.** The distribution and some characteristics of corundum-bearing basalts in Thailand // *J. Geol. Soc. Thai.*, 1978, v. 3, p. 1—38.
- Wark D.A., Miller C.F.** Accessory mineral behavior during differentiation of a granite suite: monazite, xenotime and zircon in the Sweetwater Wash pluton, southeastern California, U.S.A. // *Chem. Geol.*, 1993, v. 110, p. 49—67.

**Wilkinson J.F.G., Hensel H.D.** Nephelines and analcimes in some alkaline igneous rocks // Contr. Miner. Petrol., 1994, v. 118, p. 79—91.

**Yaemniyom N., Pongsapich W.** Petrochemistry of the Bo Phloi basalt, Kanchanaburi Province // Proceedings of the annual technical meeting, Department of Geological Science, Chiang Mai University, 1982, p. 19—52.

*Рекомендована к печати 21 февраля 2013 г.  
Н.В. Соболевым*

*Поступила в редакцию  
24 октября 2012 г.*