

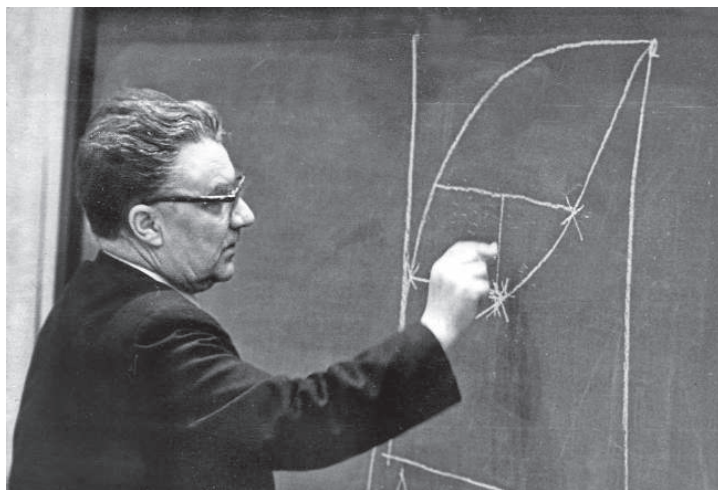
## ОСНОВНЫЕ ИТОГИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ И ЗАДАЧИ В ОБЛАСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АЛМАЗНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ\*

*В.С. Соболев  
академик*

Важнейший итог изучения месторождений алмазов за последнее десятилетие — открытие не только кимберлитовых трубок в ранее известных районах, но и новых кимберлитовых провинций. Если раньше такие провинции выявлялись главным образом в Африке (Ботсвана, Гвинея, Ангола и др.), то теперь открыты кимберлитовые поля на других континентах, где алмазы добывались только в россыпях, о происхождении которых делались самые различные предположения, либо находились лишь в виде отдельных кристаллов. <...>

др., 1972]. К сожалению, многие эти сведения, подобно данным, опубликованным в старой литературе, не доказаны. В большинстве случаев отсутствуют находки пород с включениями алмазов. Не установлены сростки алмазов с минералами пород, не изучались включения в алмазах, не проводилось крупнообъемного опробования.

Приуроченность кимберлитов к отдельным разломам или пересечениям разломов, а также закономерности их распределения на древних платформах подвергались дальнейшему изучению. Высказаны разные гипоте-



Академик В.С. Соболев

<...> Хотя выявление новых кимберлитовых провинций значительно уменьшает обоснованность предположения о связи россыпных месторождений с некимберлитовыми источниками алмазов, поиски таковых продолжались. Так, опубликованы данные о находках алмазов в базальтах Камчатки [Кутыев, Кутыева, 1975], в гипербазитах Корякского нагорья [Шило и др., 1978], в эколгитах Казахстана [Розен и

зы, поставлен вопрос о создании прогнозных карт [Мокшанцев и др., 1974]. Однако до сих пор практические результаты давали лишь общие геологические соображения о приуроченности кимберлитов к древним платформам, а главными поисковыми методами были минералогические и геофизические.

Важным достижением в геологии кимберлитов является подтверждение

\* Геология и геофизика. 1980. № 12. (Дается с некоторыми сокращениями. — *Редкол.*)



их разновозрастности. Вопреки представлениям о «молодости» всех африканских кимберлитов, еще в 60-х годах доказан докембрийский возраст трубки Премьер. Давно установлено и существование разновозрастных кимберлитов в Якутии: от среднепалеозойских до среднемезозойских. Новый метод определения возраста по соотношению изотопов U и Pb в цирконах, разработанный для низкоурановых цирконов в Геофизической лаборатории в США, позволил получить более точные данные. Для африканских трубок показан довольно широкий интервал: от 189 (трубка Мвадуи, Танзания) до 95 и даже 50 млн лет. Циркон бразильских россыпей показал возраст около 90 млн лет. В совместной работе с Институтом геологии и геофизики СО АН СССР, проведенной для якутских трубок [Дэвис и др., 1980], установлено не менее пяти возрастных этапов в интервале 450–146 млн лет: позднеордовикский, позднесилурийский, позднедевонский, пермотриасовый и позднеюрский.

По имеющимся, еще недостаточно полным данным все наиболее богатые трубки Малоботуобинского и Далдын-Алакитского районов относятся к третьему этапу, причем внутри этапа разброс достигает всего 20 млн лет.

К сожалению, отсутствие циркона пока не позволило точно определить возраст трубки Премьер, которая сейчас считается докембрийской; отсутствуют также точные определения возраста алмазов из конгломератов Витватерс-Ранд, вероятно, превышающего 1,8 млрд лет.

Большой интерес представляет открытие в Якутии трубки с сохранившейся туффитовой фауной, где в слюистом кимберлите обнаружены среднедевонские водоросли. Это, наряду с известными данными по Африке, позволяет восстановить картину образования кимберлитовых трубок вулканическими взрывами, выходящими на дневную поверхность.

За истекший период благодаря совершенствованию техники исследований особенно развились детальные ми-

нералогические исследования не только глубинных ксенолитов — как алмазоносных, так и неалмазоносных, — но и включений в алмазах. При этом наиболее важно изучение не отдельных единичных включенных минералов, а многоминеральных включений, которые являются закономерными парагенезисами. Полученные данные полностью подтвердили значительную дифференцированность мантии и кристаллизацию по крайней мере большей части алмазов не в самих кимберлитовых очагах, а в различных слоях мантии. Впервые внутри алмазов найдены минералы, прежде известные лишь в ксенолитах (санидин, дистен). Большой интерес представляет открытие в алмазах включений самородного железа (ИГиГ и ИГ ЯФ СО АН СССР), подтверждающее низкий потенциал кислорода.

Впрочем, наибольшее значение представляет открытие в мантии свободного  $\text{SiO}_2$  в виде коэсита — сначала внутри алмазов в парагенезисе с пироксеном и гранатом (парагенезис коэситового эклогита [Соболев Н.В. и др., 1976]) и сразу же затем — в ксенолите неалмазоносного гроспидита в Южной Африке [Smyth, Hatton, 1977] и алмазоносных и неалмазоносных эклогитах из кимберлитов Якутии [Пономаренко и др., 1977]. Исключительное значение этого открытия определяется тем, что температура солидуса (т. е. начала плавления) названных пород на  $300^\circ\text{C}$  ниже температуры солидуса гранатовых перидотитов, составляющих основную часть мантии. Следовательно, в этих областях отсутствует слой с накоплением расплава, что хорошо согласуется с температурами кристаллизации значительной части алмазов в интервале  $1000\text{--}1200^\circ\text{C}$ .

Данные о пониженной температуре мантии в областях древних платформ хорошо увязываются с теоретической моделью образования кимберлитов, разработанной в ИФЗ АН СССР [Артюшков, Соболев С.В., 1977]. В этой модели показано, что ярко выраженный астеносферный слой в мантии, подобный имеющему место в тектонически активных областях, явился бы пре-

пятствием для распространения с глубины трещин с кимберлитовой магмой. Это, по-видимому, и объясняет приуроченность кимберлитового магматизма только к древним платформам.

Большой интерес представляют также первые находки ксенолитов алмазоносных гипербазитов в кимберлитах Якутии [Пономаренко, 1977; Пономаренко и др., 1977; Похиленко и др., 1976; Соболев В.С. и др., 1969], США [McCallum, Eggler, 1976] и Лесото [Dawson, Smith, 1975], хотя до настоящего времени недостаточно выяснено резкое преобладание алмазоносных эклогитов по сравнению с гипербазитами, т. е. обратное тому, что наблюдается в большинстве парагенезисов внутри алмазов. Однако и в алмазах различных трубок и районов отношения эклогитового и ультраосновного парагенезисов варьируют в значительных пределах: для месторождений СССР роль первого существенно повышается в алмазах россыпей Урала и севера Сибирской платформы, а для кимберлитовых трубок Южной Африки установлены почти все переходы от 98 % алмазов ультраосновного парагенезиса в трубке Финш до 90 % эклогитового в трубке Орапа. Количество подобных сведений так велико, что делаются попытки картирования глубоких горизонтов верхней мантии. При этом использованы данные не только по кимберлитовым трубкам, но и по ксенолитам из щелочных базальтоидов и океаническим базальтам [Глубинные ксенолиты..., 1975].

Приятно отметить уже общепризнанный факт, что большая часть исследований как по алмазоносным ксенолитам, так и по включениям в алмазах принадлежит советским ученым.

Кроме отмеченных результатов следует подчеркнуть, что впервые именно на якутском материале удалось исследовать состав включений в алмазах из ксенолита и эклогита, перидотита [Соболев В.С. и др., 1972; Соболев Н.В., 1974]. Эти результаты, с одной стороны, показали общность парагенезиса, с другой — выявили некоторые закономерные изменения состава включенных в алмаз и включающих алмаз минералов.

Парагенезисы включений позволяют, используя результаты экспериментов и термодинамические расчеты, восстановить параметры образования алмазов. Температуры варьируют в широких пределах — от 1000 до 1500 °С. В отношении давления экспериментальными работами и минералогическими исследованиями подтвердилось высказанное ранее общее положение о важном значении перераспределения Сг из окислов в силикаты при повышении давления [Соболев В.С., Соболев Н.В., 1967]. Были также проведены экспериментальные исследования системы гранатов пирроп — кноррингит — гроссуляр — уваровит [Малиновский и др., 1976]. На основе полученных данных давление для алмазов оценивается до 80 кбар. Как и следовало ожидать, верхний предел лимитируется превращением оливина, который всегда встречается в алмазе в виде обычной модификации.

Большое значение в понимании минералогии мантии имеют экспериментальные исследования пироксенов, пересыщенных SiO<sub>2</sub> [Ханухова и др., 1976], существование которых в мантийных породах впервые было доказано для гроспидитов — новых пород, открытых в ксенолитах из якутских кимберлитов [Бобриевич и др., 1960; Sobolev N.V. et al., 1968]. Сделаны выводы, существенно ограничивающие возможности образования таких пироксенов при перекристаллизации базальтов, погруженных в мантию [Соболев В.С., Соболев А.В., 1977].

Изучение включений показало, что они часто заполняют октаэдрические формы, обусловленные формой самого алмаза с индукционной штриховкой, т. е. эти минералы растут одновременно [Соболев Н.В. и др., 1972]. Причем октаэдры могут быть заполнены и одним минералом, и сростком нескольких минералов.

На новом этапе научно-исследовательских работ состав минералов-спутников, в первую очередь граната и хромита, приобретает и новое поисковое значение, когда можно говорить о поиске не просто трубок, а непосредственно алмазоносных трубок [Соболев Н.В., 1971].



Универсальный характер закономерности связи особенностей состава граната с алмазонасностью кимберлитов подтвержден в результате изучения гранатовых концентратов из кимберлитов Южной Африки, Лесото, Ботсваны, США и Индии.

<...>

Получены важные результаты при изучении физических свойств алмазов. Проведено изучение распределения различных азотных центров по кристаллам природного алмаза [Соболев Е.В., 1978]. Обнаружены факты чередования различных состояний N по зонам роста, находящиеся в резком противоречии с распространенной гипотезой о постростовом формировании азотных ассоциаций в процессе высокотемпературной диффузии. В совокупности с ранее известными фактами они позволяют считать основные азотные центры в кристаллах природного алмаза сингенетичными алмазу и ставить вопрос о роли соединений азота при его образовании.

Чрезвычайно интересные материалы получены по изотопному составу углерода в алмазах. В 1972 г. совместными работами ЯФ СО АН и ГЕОХИ АН СССР было показано, что в алмазах, в отличие от прежних представле-

ний, существуют значительные вариации  $\delta^{13}\text{C}$  в сторону обогащения легким изотопом. Такая аномалия связывалась с окрашенными алмазами, и благодаря ей обосновывалась гипотеза их образования на малых глубинах. Исследования алмазов с включениями (ИГиГ и ГЕОХИ) показали связь главных вариаций изотопного состава отнюдь не с их окраской, а с парагенезисом [Соболев Н.В. и др., 1979]. Выяснилось, что все алмазы ультраосновного типа парагенезиса — независимо от морфологии, окраски и нахождения в кимберлитах или россыпях — имеют стандартный узкий диапазон значений  $\delta^{13}\text{C}$  (от  $-2$  до  $-8$  ‰). Аномальный изотопный состав — как облегченный ( $\delta^{13}\text{C}$  до  $-34$  ‰), так и утяжеленный (до  $+1$  ‰) — имеют только алмазы эцлогитового типа парагенезиса. Эти данные позволили обосновать сходство алмазов россыпей севера Сибирской платформы с алмазами трубки Орапа (Ботсвана), что, несомненно, имеет значение для правильной постановки поисковых работ.

Из экспериментальных данных известно, что эцлогиты в мантии могут образоваться двумя путями: выплавлением богатых водой расплавов из гипербазитов с застыванием на больших



Два поколения учеников академика В.С. Соболева: академик Н.В. Соболев (слева) и чл.-кор. РАН Н.П. Похиленко

глубинах и за счет погружения на большие глубины и эклогитизации базальтовых пород [Соболев В.С., 1976]. Особенности изотопного состава углерода алмазов, по нашему мнению, однозначно доказывают, что хотя бы часть эклогитов возникла вторым путем, при этом привносился экзогенный, обычно облегченный углерод из прослоев осадочных пород в базальтах, смешивающийся в различных соотношениях с эндогенным углеродом. Естественно, что в этих случаях могли получаться самые различные соотношения вплоть до совпадения с областью изотопного состава мантийного углерода.

Установленные факты дают новое подтверждение фундаментальному положению геологии о возможности погружения блоков базальтовой коры, захватывающей экзогенный углерод [Соболев В.С., Соболев Н.В., 1980]. <...>

#### ВЫВОДЫ

Задачи исследований на предстоящую пятилетку можно разделить на две органически взаимосвязанные части: научные фундаментальные исследования и решение практических задач.

Вне всякого сомнения, изучение минералогии алмазов и их спутников дает наиболее достоверные сведения о строении и развитии глубинных частей Земли в интервале 150–250 км, о которых сейчас можно говорить гораздо увереннее, чем о мантии и коре на меньших глубинах. Развитие техники исследования в тесной связи с развитием экспериментальных исследований при высоких давлениях стимулирует дальнейшее комплексное изучение минералогии алмазов, глубинных ксенолитов и самих кимберлитов. Нужно еще с большей детальностью проводить исследования парагенезисов минералов в отдельных алмазах, обратив особое внимание на изменение состава как в различных зернах, так и в пределах одного зерна. Весьма важно также дальнейшее накопление данных по минералогии глубинных ксенолитов, в том числе изучение ми-

неральных включений в алмазах из этих ксенолитов. Накопление статистического материала должно завершиться составлением карт распространения кимберлитов.

Большое значение для наших представлений о земной мантии и о генезисе кимберлитов имеет продолжение изучения неалмазоносных ксенолитов в кимберлитах, захваченных на менее глубоких горизонтах мантии, а также всех типов глубинных ксенолитов, выносимых другими магматическими породами, главным образом щелочными базальтоидами. За последнее пятилетие в этом отношении накоплен большой фактический материал, но многие вопросы еще остаются спорными, а выдвигаемые гипотезы нуждаются в более полном обосновании [Глубинные ксенолиты..., 1975].

Нужно продолжить и углубить экспериментальное исследование силикатных систем при высоких давлениях в интервале 30–100 кбар. Здесь особенно важно закончить детальное изучение системы гранат–пироксен и гранат–оливин, а также системы плавления оливин–гранат–пироксен и гранат–пироксен–коэсит при различных давлениях. Желательно также закончить изучение пироксенов, пересыщенных  $\text{SiO}_2$ , что важно для понимания процессов минералообразования в мантии.

<...>

В последние годы стала развиваться новая техника лазерных микроана-



Это — кимберлит



лизаторов, позволяющих анализировать включения в прозрачных минералах без их вскрытия. Для минеральных включений в алмазах это может иметь большое значение при анализе без разрушения кристалла алмаза. Велика роль новой техники и в решении вопроса о наличии флюидных включений в алмазах, о которых имеются лишь отдельные недостаточно проверенные данные.

Вместе с тем полученные материалы по термодинамическим параметрам минералообразования должны найти более полное применение для построения геофизических моделей.

Одна из главных задач ближайшего периода — более углубленное исследование минералогии самих кимберлитов, особенно первых стадий их кристаллизации. Прежде всего следует достаточно хорошо отличать алмазы, вынесенные из мантии, и образовавшиеся в самом кимберлитовом очаге. Если большая роль мантийных алмазов сейчас, по существу, полностью доказана [Соболев Н.В., 1974], то не только количественное значение, но и сама кристаллизация алмазов в кимберлитовом расплаве достоверно еще не установлены. Это относится и к минералам первой стадии кристаллизации, особенно мегакристам. Так, при построении отдельных разрезов мантии на основании изучения кимберлитов высказаны предположения о существовании слоя мегакристов [Eggler, McCallum, 1974].

Следует также продолжить изучение отличий глубинных минералов, возникших совместно с алмазами, от минералов, непосредственно следующих за их кристаллизацией, но уже образующихся в условиях более высокого потенциала кислорода, что хорошо устанавливается для хромитов и особенно ильменита. Эти исследования должны быть тесно увязаны с минералогическим изучением мегакристов менее глубинных пород, где также

не всегда можно провести четкую грань между ксенолитами и кристаллами, выросшими в магматическом очаге. Эти работы должны сопровождаться поисками расплавных и других типов первичных включений, что для большей части мегакристов до сих пор не сделано.

Переходя к краткому рассмотрению задач прикладного значения, прежде всего нужно отметить дальнейшую разработку поисковых критериев кимберлитовых тел вообще и алмазоносных кимберлитов в частности. Эта разработка должна идти по линии геологических (тектонических) построений, в особенности по внедрению и развитию минералогических критериев алмазоносности.

Следует уделить внимание развитию и применению изотопных методов определения абсолютного возраста кимберлитов, преимущественно таких весьма точных методов, как U–Pb метод по цирконам. В ряде случаев однозначный ответ о правильном направлении поисковых работ можно получить лишь с помощью этих данных.

Особое внимание нужно уделить исследованию степени изношенности минералов с применением новых методов в комплексе с палеогеографическими исследованиями, которые позволили бы с достаточной точностью восстановить древнюю речную сеть, что представляет исключительный интерес при поисках трубок, перекрытых осадочными отложениями и траппами.

Наряду с поисками новых кимберлитовых тел и полей должно уделяться самое серьезное внимание возможным некимберлитовым источникам алмазов, главным образом там, где известно их нахождение в россыпях. При этом важнейшей задачей, которая до настоящего времени остается еще нерешенной, является нахождение прямых доказательств, т. е. образцов пород, содержащих видимые кристаллы алмаза.