

## Роль петролого-минералогических и геохимических исследований в оценке потенциальной алмазоносности кимберлитов

Большое внимание в статье уделено петролого-минералогическим характеристикам кимберлитовых пород с различной продуктивностью. Приведены примеры расчётов эволюции исходного субстрата и реконструкции мантийных разрезов, что позволило высказать предположения о зональности литосферной мантии кимберлитовой провинции и её алмазоносных территорий.

*Ключевые слова:* кимберлиты, петролого-минералогическая характеристика, геохимия, алмазоносные провинции.

ЗИНЧУК НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, nnzinchuk@rambler.ru

Западно-Якутский научный центр (ЗЯНЦ) Академии наук Республики Саха (Якутия), г. Мирный

## The role of petrological, mineralogical and geochemical studies in assessing the potential diamond grade of kimberlite

N. N. ZINCHUK

West-Yakutian Scientific Centre of the SR (Yakutia) Academy of Sciences, Mirni

The focus of this study is the determination of petrological and mineralogical characteristics of kimberlite pipes with various productivity. Here we provided some examples of the appraisal of the initial substrate evolution and reconstructions of mantle sections that allowed us to suggest a possible zonation of lithosphere mantle of a kimberlite province and its diamondiferous territories.

*Key words:* kimberlite, petrological and mineralogical characteristics, geochemistry, diamondiferous provinces.

Отличительной чертой алмазных месторождений коренного типа (трубок взрыва) является их глубинное происхождение и длительная генетическая связь с процессами тектономагматической деятельности в истории развития древних платформ мира [12–14, 17–21]. Существование глубинных (мантийных) очагов, взрывно-импульсный характер процесса становления кимберлитовых трубок, сопровождающийся выносом не только собственно алмазосодержащих пород (кимберлитов и лампроитов), но и (в своём объёме) большой массы химических веществ в виде газовой-жидкой фазы и газовых эманаций, выбросов летучих компонентов с участием примесных химических элементов, привели к формированию этих уникальных пород. По своему химическому составу и геохимическим особенностям кимберлиты существенно отличаются от пород окружающей (и вмещающих их) среды, представляя собой на региональном древнем и современном ландшафтном фоне своего рода природную геохимическую аномалию. Определяя геохимическое понятие «алмазное месторождение», заведомо подразумевается аномаль-

ное природное минералого-геохимическое и петрологическое явление в виде конкретного геологического тела (трубки, жилы, дайки, силлы или штоки), обладающего конкретной вещественно-продуктивной специализацией. Последняя находит своё отражение [1–11, 15–17] в повышенных значениях местного геохимического фона по тем химическим элементам, которые присущи данному конкретному алмазному месторождению кимберлитов или лампроитов, то есть их типоморфным (индикаторным) элементам, а также сопровождающим их эволюционным процессам от момента становления рудных тел до настоящего времени. Выделение типоморфных элементов кимберлитов (элементов-индикаторов) основано на сравнительном анализе петрохимического и геохимического состава магматических и осадочных образований. При этом особое внимание уделяется определённым группам элементов-индикаторов, свойственным не только для кимберлитов (лампроитов), но и для других типов магматитов, пространственно ассоциирующихся с потенциально алмазоносными породами. Денудация, размыв и рассеяние продуктов

кор выветривания (КВ) различного типа магматитов обычно сопровождается формированием в осадочных отложениях минералого-геохимических шлейфов. Отбраковка таких ореолов от кимберлитовых основана на знании эталонных геохимических характеристик как собственно кимберлитов, так и ассоциирующих с ними магматических пород основного и щелочно-ультраосновного состава [22–29].

**Фактический материал, методология исследований и обсуждение результатов.** Анализ химического и геохимического состава кимберлитовых и конвергентных им пород позволяет отметить [1–3, 12, 18–21] заметные вариации в содержании петрогенных компонентов, которые определяются как эндогенными, так и экзогенными факторами. К особенностям химизма кимберлитовых пород следует отнести высокую магнезиальность (MgO обычно более 30 мас.%) и очень высокую степень насыщенности летучими ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ), примерно равные количества магнезии и кремнезёма ( $\text{SiO}_2/\text{MgO}$  обычно в пределах 0,9–1,1), большой размах концентраций  $\text{TiO}_2$  (от долей процента до 6 мас.%, иногда более) при обычном  $\text{TiO}_2/\text{K}_2\text{O} > 1$  в кимберлитах первой группы и  $\text{TiO}_2/\text{K}_2\text{O} < 0,5$  в кимберлитах второй группы, широко варьирующие значения  $\text{Ti}/\text{Zr}$  (20–200),  $\text{Zr}/\text{Nb}$  (2–3, в кимберлитах II группы менее 1). Петрогеохимические исследования позволяют конкретизировать диагностику пород, предположить их мантийные источники и сопоставить с кимберлитами первой и второй групп Южно-Африканской платформы (ЮАП), для чего используются диаграммы  $\text{K}_2\text{O}-\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}$  и некоторые другие. В целом по химическому составу породы всех полей как южной, так и северной частей провинции отвечают семейству ультраосновных пород, что подтверждается высоким содержанием магния и повышенными значениями отношения магния к железу. Эта тенденция сохраняется на Сибирской платформе (СП) как в выветрелых кимберлитах, так и в интенсивно карбонатизированных их разностях и пикритах. В последних, а также в карбонатитах Орто-Благинского поля фиксируются пониженные (по сравнению с кларками для ультраосновных пород) концентрации Si, Fe, Mg, Cr, Ni при повышении доли Ti, Al, K, P, Sr, Zr, Nb, Ta и других элементов, свойственных щелочным породам. Кроме проявлений отмеченного Орто-Благинского поля заметно обособляются по вещественному составу брекчиевые породы трубок и аномальных объектов трубочного типа Биригиндинского и частично Ары-Мастахского полей, которые обнаруживают карбонатитовые тенденции (их ведущие минералы: кальцит, сидерит, магнетит, апатит, пироксид, часто бадделейт, циркон и др., высокое содержание CaO,  $\text{CO}_2$ , MnO,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , при пониженном ко-

личестве  $\text{SiO}_2$  и  $\text{TiO}_2$ ); по указанным признакам они существенно отличаются от кимберлитов и не могут рассматриваться в качестве потенциальных коренных месторождений алмазов. Собственно кимберлитовые породы отличаются наряду с наиболее высокими содержаниями Mg, Cr и Ni наибольшими значениями Mg/Fe и Ni/Co. Последний параметр при величине более 12 наряду с повышенной долей тяжёлых редких элементов показывает, как правило, принадлежность кимберлитовых пород к алмазонасыщенным разновидностям.

Совместно с сотрудниками ИГЕМ РАН проведены исследования по выработке новых критериев диагностики алмазонасыщенных кимберлитов [7]. Для этой цели использована информация по петрологии и классификации кимберлитов, основанная на комплексном петрогеохимическом (ICP-MS, XRF, изотопия Pb, Nd, Sr) исследовании. По кимберлитовым полям Сибирской платформы подтверждена принадлежность пород (38 трубок 13 полей) к кимберлитам с учётом дискриминантных отношений ( $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2/\text{MgO}$ ,  $\text{Ti}/\text{Zr}$ ,  $\text{Nb}/\text{Zr}$  и др.) и изотопного состава Nd, Sr в породах, составов породообразующих минералов (слюда и перовскит). Редкие отклонения отдельных параметров составов ( $\text{Zr} > 450$  ppm в породах, каймы тетраферрифлогопита и др.) могут быть связаны с условиями кристаллизации расплавов или метасоматическими изменениями. Кимберлиты II (оранжиты) и лампроиты, сведения о которых появились в последние годы в литературе, среди изученных образцов не установлены. Выделены три петрогеохимические группы кимберлитов: низкотитанистые ( $\text{TiO}_2 < 1$  мас.%,  $\text{Zr}$  44–77 ppm,  $\text{Ce}$  21–70 ppm) – Накыинское поле, а также трубка Надежная (Чомурдахское поле), умеренно-титанистые ( $\text{TiO}_2$  1,0–2,5 мас.%,  $\text{Zr}$  50–280 ppm,  $\text{Ce}$  58–240 ppm) – южные поля (Мирнинское, Алакит-Мархинское и др.), некоторые трубки северных полей (Дама, Дьянга, Мгришница и др.), высокотитанистые ( $\text{TiO}_2 > 2,5$  мас.%,  $\text{Zr}$  125–690 ppm,  $\text{Ce}$  100–284 ppm) – большинство трубок северных полей провинции. Кимберлитам каждой группы свойственны также характерные величины отношений изотопов Nd, Sr, Pb, лёгких (Be, V, Li), а также REE и HFSE элементов [18]. Новый тип низкотитанистых алмазонасыщенных кимберлитов с характерными геохимическими особенностями (низкие содержания REE, HFSE, высокий –  $\text{Be}/\text{Nd}$  и др.) установлен в Накыинском поле (НКП) Средне-Мархинского алмазонасыщенного района (СМАР). Выявлены вариации составов мантийных источников, времени и режимов процессов кимберлитообразования. BSE или слабообогатённая мантия I типа – источник низкотитанистых кимберлитов трубки Нюрбинская (Nd около 0–0,2), для трубки Ботуобинская –

слабодеплементированная мантия. Источник умеренно- и высокотитанистых кимберлитов находился в области деплементированной мантии (Nd от +3 до +5). Судя по величинам отношений изотопов Pb, в кимберлитах трубки Нюрбинская и ряде других присутствует доля вещества коры, поступившего, по-видимому, при мантийном метасоматозе. Установлен ряд геохимических критериев диагностики алмазоносных объектов СП: а) устойчивое умеренное содержание  $\Sigma$  HREE (Накынское, Мирнинское и другие поля) в низко- и умереннотитанистых кимберлитах; б) «накынский» тип алмазоносных кимберлитов, который может быть эффективно идентифицирован с использованием статистических моделей (дискриминации, классификации с использованием порядковых переменных, множественной регрессии); в) особенности диаграммы Ni/Be–Y/Be (основанной на свойствах структуры геохимических связей), которая позволяет отделять [2–4, 17–20, 30–36] поля высоко- и среднеалмазоносных кимберлитов (Накынское, Мирнинское) от слабоалмазоносных проявлений (Куойкское и др.). Проведённые в последние годы петрологические и минералогические исследования пород кимберлитовых тел Куойского поля показали [23] существование локальной неоднородности литосферной мантии таких территорий северной части СП. В пределах Куойского поля выделяется восточная зона, включающая северо-восточную и восточную группы кимберлитовых тел, которые отличаются наличием высокохромистого граната с кноррингитовым миналом и доминированием на графиках  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –CaO для гранатов аномального лерцолит-верлитового тренда. Во всех диаграммах с высокохромистым пиропом обнаружены и высокохромистые минералы алмазоносного парагенезиса [23]. Чёткие различия существуют и для граната между мезозойскими (Куойским и Молодинским) и палеозойскими (Чомурдахским, Огонер-Юряхским, Мерчимленским и Толупским) полями, которые также указывают на существование региональной неоднородности литосферной мантии на севере Сибирской платформы.

Определение редких элементов методом ICP MS, выполненное в аналитическом центре ОИГГМ СО РАН с использованием лазерной абляции (LAM ICP MS), позволило получить [8] существенную и интересную информацию о геохимических особенностях кимберлитов и их индикаторных минералах (ИМК). Проверка другими методами показала хорошую сходимость результатов [34]. Методами ICP MS изучены составы минералов из 11 кимберлитовых трубок более чем на 40 элементов. Из трубки Удачная изучено три выборки ИМК, представляющие перидотиты, эклогиты и пироксениты. Наибольшее разнообразие

спектров составов минералов обнаруживают перидотиты. Среди минералов выделяются клинопироксены, которым свойственно обогащение литофилами (LILE) и лёгкими редкими землями. Необходимо отметить, что анализ сканированием мелкозернистой основной массы кимберлитовых пород даёт некоторые преимущества, поскольку позволяет избежать влияния мега- и ксенокристов. Сравнение микроэлементного состава кимберлитов различной продуктивности, включая распределение редкоземельных элементов (рис. 1), показывает сходство спектров поведения лёгких редкоземельных элементов и различия по размаху концентраций тяжёлых редкоземельных элементов в промышленно алмазоносных кимберлитовых телах (Нюрбинская, Юбилейная и др.). Несколько отличается спайдеграмма кимберлитов трубки Зарница по пологому распределению лёгких РЗЭ (Eu, Gd, Dy, Ho, Y, Er, Yb и Lu). Заметно отличаются по снижению концентраций Rb, Th, U, Nb, Ta, Pb и других элементов породы из некоторых трубок Анабарской группы (аномалии 17/1, 71/63 и др.), а по увеличению Ba и Pb – 70/89. В целом можно отметить более пологие спектры распределения элементов в породах трубок Прианабарья по сравнению с кимберлитовыми телами промышленно алмазоносных районов. И ещё одна тенденция – серпентинизированные кимберлиты обеднены LILE-элементами. В ИМК распределение редких и редкоземельных элементов обнаруживает различные тенденции, что можно наблюдать на примере перидотитовых минералов из кимберлитовой трубки Удачная (рис. 2). Так, в моноклинных пироксенах распределение имеет обычно пологий характер спектров, которые для гранатов и других минералов характеризуются заметным размахом концентраций элементов, хотя в отдельных образцах могут проявляться обратные тенденции. Чаще пологие S-образные REE спектры характеризуют клинопиксены и гранаты из деформированных истощённых перидотитов (обр. UD-3), при слабом обогащении U и Sr, минимумы Zr более выражены для граната, левая часть мульткомпонентного спектра почти плоская. В клинопироксенах часто фиксируется небольшое обогащение литофилами (LILE) и лёгкими редкими землями. В спектре клинопироксена из порфирикластического перидотита UD-11 наблюдаются пики повышенных значений U, Ta и Nb. Клинопироксенам из лерцолитов на REE диаграмме свойственны спектры с одновременным уменьшением  $\text{La/Yb}_n$  и общим повышением уровня редких элементов. С уровнем редких земель коррелируют также минимум по концентрации Ba и небольшой пик Sr. У гранатов заметны положительные пики Pb и U (см. рис. 2).

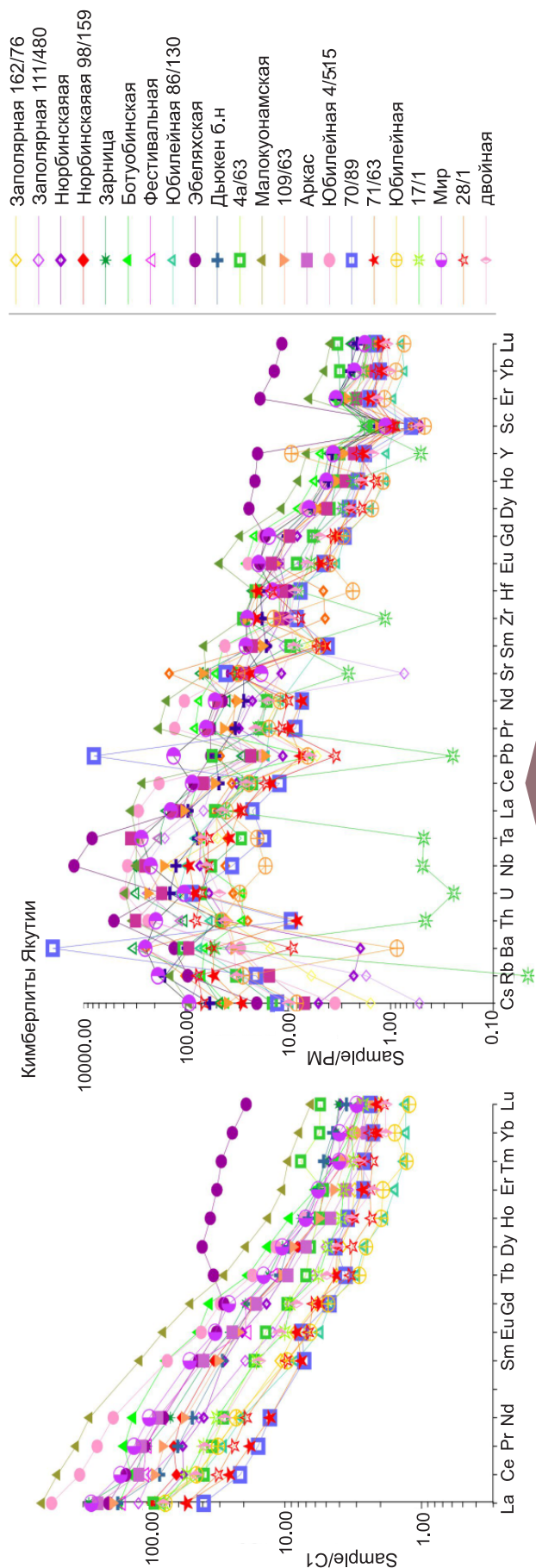


Рис. 1. Распределение редкоземельных элементов в кимберлитовых породах СП

Для трубок ряда полей СП построены *TR*-диаграммы на основе методов пироксеновой и гранатовой мономинеральной термобарометрии (рис. 3). Реконструированные по полученным данным мантийные разрезы под Далдынским кимберлитовым полем (ДКП) обнаруживают вариации в строении. Для трубки Удачная гранатовая термобарометрия подтверждает присутствие восьми горизонтов в мантийной колонне, под трубкой Зарница, при использовании для *PT*-реконструкций на основе одного минерала, получено три дискретных уровня, а с применением совмещённой гранат-пироксеновой термобарометрии – те же восемь дискретных горизонтов. Для трубки Долгожданная гранатовая термобарометрия даёт шесть горизонтов, а по клинопироксеновым построениям выделяется геотерма разогрева в нижней части разреза, который определяется также и для трубки Иреляхская. Наиболее детально построены *TR*-диаграммы и реконструированы мантийные разрезы под кимберлитовыми телами Алакит-Мархинского поля (см. рис. 3). Существенный разогрев (от 38 до 45 мвт/м<sup>2</sup>) установлен в нижней части в пределах интервала 8–10 кбар (горизонт гранатовых дунитов). Деление на 8–9 интервалов отчётливо заметно на диаграмме трубки Айхал. Близкую структуру имеет мантийная колонна под трубкой Юбилейная, литологически существенно лерцолитовая, за исключением уровня 4–5 кбар, отвечающего истощённым породам в основании разреза. Высокотемпературная гранатовая ветвь (~ 45 мвт/м<sup>2</sup>) до уровня 40 кбар, вероятно, соответствует пироксенитам или контактовым зонам вблизи системы подводящих каналов. Мантийная колонна под трубкой Комсомольская истощена гораздо меньше, чем под трубками из южной части поля. Отклонения в низкотемпературную область, обычно характерные для эклогитоподобных пород, соответствуют интервалу 58–50 кбар. Лерцолитовая мантия устанавливается вплоть до 40 кбар, выше вероятны гранатовые гарцбургиты. Под трубкой Сытыканская нижняя часть колонны сложена гранатовыми гарцбургитами и дунитами, выше возможны линзы эклогитоподобных пород. Пироксенитовая линза развита в интервале 45–35 кбар (см. рис. 3) под гарцбургитами.

Несмотря на различия в химических особенностях мантийных минералов из трубок Мир и Интернациональная Мирнинского кимберлитового поля (МКП), для них характерно приблизительно одинаковое строение мантийных разрезов. Под трубкой Мир истощённые перидотиты предполагаются вплоть до 45 кбар и лишь выше возможны линзы пироксенитов и эклогитов в существенно лерцолитовом со слюдой субстрате. Под трубкой Интернациональная разрез мантийной колонны близок таковому

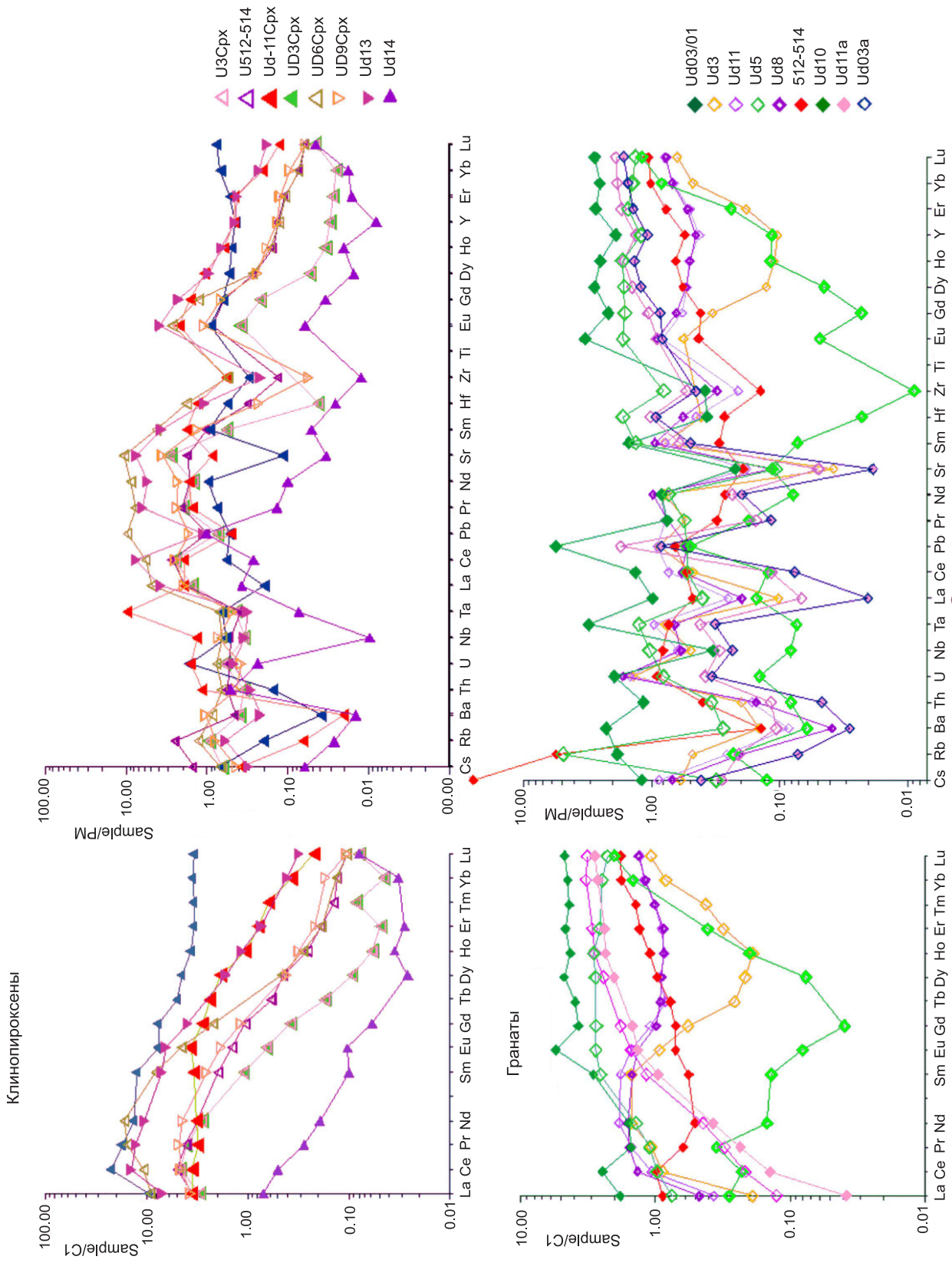


Рис. 2. Графики распределения редкоземельных элементов и мультикомпонентные спектры для перидотитовых минералов из кимберлитовой трубки Удачная

трубки Мир. На астеносферном уровне и выше – до 50 кбар – мантия разогрета, а в строении её разреза под трубками можно выделить четыре горизонта. Верхне-Мунское кимберлитовое поле (ВМКП) отличается тем, что в основании мантийных колонн предполагаются сравнительно неистощённые перидотиты, умеренно метасоматизированные. Эклогитовая линза, которая просматривается на уровне около 50 кбар под трубкой Заполярная и несколько менее выражена под трубкой Новинка, возможно, служила экраном для метасоматических компонентов, просачивавшихся снизу. Высокотемпературная ветвь по гранатовой термобарометрии характерна для трубки Новинка и ещё более свойственна для трубки Деймос, где пироксены сравнительно редки в концентрате, возможно, из-за высокой степени разогрева. Ещё более разогрета перидотитовая колонна под трубками Накынского поля. Характерной их особенностью является сравнительно большая доля глубинных гранатов и высокая степень разогрева. Возможно, эта причина привела к отсутствию типичных ильменитовых желваков и развитию пироксеновых мегакристаллов. Строение разреза под трубками Нюрбинская и Ботубинская имеет многоярусный характер: по данным гранатовой термобарометрии, под каждой из них прослеживается не менее шести горизонтов.

Изложенные выше материалы в целом подтверждают слоистое строение мантийных разрезов под трубками и конкретизируют обобщённый разрез литосферной мантии восточной части СП с вариациями состава в субмеридиональном направлении. По оценкам *PT*-параметров, для трубки Обнаженная (северная часть субпровинции) получены температуры от 800 до 1110 °С, давление от 30 до 40 кбар, что находится за пределами поля стабильности алмазов, при этом для эклогитов характерны температуры от 950 до 1110 °С, для перидотитов – 900–1050 °С, а для пироксенитов – 800–1100 °С. Мантия под центральной частью субпровинции (трубки Юбилейная и Удачная) отличается тем, что степень истощения растёт с глубиной, а тепловой поток соответствует 35–40 мВ/м<sup>2</sup>. Перидотитам свойственны метасоматические ассоциации с многими неравновесными минералами. Среди особенностей мантии под южной частью субпровинции (МКП) следует отметить присутствие высокомагнезиальных гранатовых перидотитов и пироксенитов из трубки, кристалломорфология и физические свойства алмазов [9, 13] дифференцированы на уровне субпровинции, поля и каждой трубки. Индивидуальные особенности состава и физических свойств индикаторных минералов трубок выявляются на статистическом уровне.

Анализ распределения несовместимых редких элементов в породах и минералах из зернистых перидотитов, не имеющих признаков модалного метасоматизма в виде новообразованных минералов, показал, что как по уровню содержаний, так и по характеру распределения элементов ксенолиты показывают последовательный переход от низких «первичных» концентраций к содержаниям и распределениям в метасоматизированных ксенолитах. Эта последовательность объясняется метасоматическим воздействием на мантийное вещество водно-углекислых флюидов, а также, возможно, карбонатитовых расплавов или расплавов, сформировавшихся в островодужной обстановке. Метасоматическая проработка мантийной литосферы происходила во время общего метаморфизма, соответствующего этапу кратонизации, и проявилась в большинстве случаев лишь в «скрытой» геохимической форме. В период тектономагматического кимберлитового цикла под континентальной литосферной плитой возникли очаги расплавов, давшие начало ассоциации мегакрист, а также преобразующие вещество астеносферы и нижних частей литосферной плиты. Поведение индикаторных несовместимых редких элементов (REE, Y, Nb, Hf, Zr, Ti) в гранатах и клинопироксенах из деформированных лерцолитов (астеносферное вещество) и из литосферных метасоматитов реакционного С-типа отражает геохимические различия мантийного метасоматизма в верхней части астеносферы и в низах литосферы и указывает на их возможную связь с единым глубинным источником. Различия в характере строения, минералогии и геохимии некоторых кимберлитовых трубок позволяют предположить, что в мантийной литосфере (даже в пределах куста трубок) могли существовать неоднородности и локальные зоны метасоматоза и просачивания.

**Заключение.** Таким образом, проведёнными исследованиями отмечены высокие концентрации СаО и СО<sub>2</sub> в вулканогенно-осадочных образованиях верхних частей диатрем СП, что вызвано повышенной ролью обломков вмещающих пород терригенно-карбонатного и карбонатного состава. В этих же частях диатрем отмечена пониженная концентрация TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и ΣFe. В основании раструба трубок и в их вертикальных каналах, где преимущественно распространены эруптивные брекчии и массивные порфиновые кимберлиты, постепенно снижается содержание карбонатных компонентов, хотя их доля в кимберлитах СП даже на глубоких горизонтах диатрем всё же велика. За счёт уменьшения количества СаО и СО<sub>2</sub> на средних уровнях диатрем возрастает роль ряда других компонентов – SiO<sub>2</sub>, MgO и H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>. Содержания P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub> и K<sub>2</sub>O остаются примерно

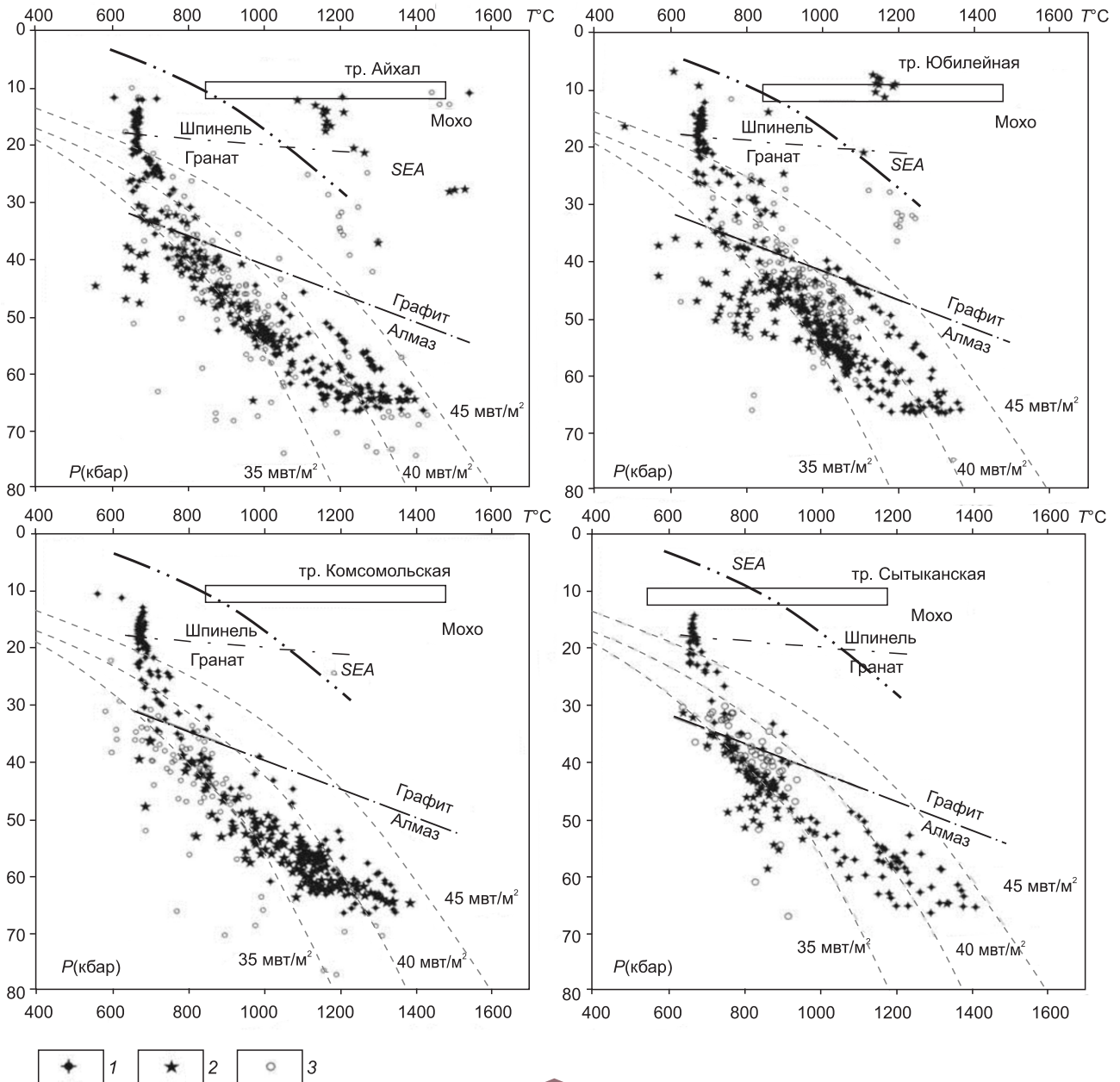


Рис. 3. *P*-*T*-диаграммы для мантийных пород под трубками Алакит-Мархинского кимберлитового поля:

Продуктивность кимберлитов: 1 – средне-, 2 – высоко-, 3 – низкоалмазоносные

одинаковыми по всему разрезу диатрем или изменяются несущественно, как и концентрации основных породообразующих оксидов. В большинстве изученных трубок СП с глубиной несколько увеличивается содержание  $K_2O$ , что обусловлено снижением степени хлоритизации флогопита. С воздействием на кимберлиты вмещающей среды связано возрастание с глубиной роли  $Na_2O$ ,  $Cl$  и  $SO_3$  в тех трубках, где вмещающими породами на глубоких

горизонтах являются галогенные и гипсоносные толщи. На глубоких горизонтах некоторых трубок повышается роль  $Fe_2O_3$ , что объясняется развитием здесь пирроаурита или превращением амакинита в гидроксиды железа. В некоторых трубках (Интернациональная и др.) с глубиной снижается количество  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$ , а также возрастает концентрация  $MgO$  и  $H_2O^+$ , что обусловлено уменьшением в кимберлитах примеси терригенного материала.

По распределению сидерофильных элементов (Fe, Mg, V, Mn, Co, Cr и Ni) кимберлиты существенно отличаются от щелочных базальтов и близки к ультраосновным породам. По уровню концентрации сидерофильных элементов кимберлиты заметно отличаются от калиевых щелочных базальтов, щелочных оливиновых базальтов, а также от пикритовых порфиритов. В целом для кимберлитов выделены [3, 8, 17–20] две основные группы химических элементов. Первая группа – некогерентные (Na, K, Rb, Li, Cs, Sr, Ba, Th, U и TR), которыми кимберлитовая магма обогащена относительно ультраосновных мантийных пород. Вторая группа – когерентные (Ti, Zr, Nb, Ta, V, Mn, Pb, Zn, Sc, Au, Ag, Cr, Ni и Co) – подразделяется на подгруппу относительно легкоплавких элементов (Ti, Zr, Nb, Ta, V, Mn, Pb и Zn), которыми кимберлиты обогащены по сравнению с мантийными перидотитами; подгруппу индифферентных элементов (Sc, Au и Ag), содержание которых близко и в кимберлитах, и в перидотитах; подгруппу тугоплавких элементов (Cr, Ni и Co), которыми обеднена кимберлитовая магма. Сочетание этих геохимических признаков позволяет уверенно диагностировать кимберлиты алмазоносной провинции. Проявление признаков геохимической специализации находит своё продолжение и внутри кимберлитовых полей. Кимберлиты южной и центральной частей СП (МКП, АМКП, ДКП и ВМКП) отличаются от кимберлитов северных территорий более низкими концентрациями Ti, Al, Fe, K, P и по значениям различного рода петрохимических показателей (Si/Mg, Fe<sub>общ.</sub> и др.). По поведению ряда петрогенных компонентов и значениям петрохимических показателей, на примере ДКП и АМКП, установлены признаки латеральной зональности в распределении концентрации ведущих окислов и малых элементов в составе кимберлитов. Кроме того, в направлении от центра к периферии провинции (с юга на север от ДКП к Дюкенскому полю) установлены чётко выраженные вариации концентраций содержания микроэлементов кимберлитов. Многими исследователями отмечалось обогащение кимберлитов щелочами, железом и титаном при одновременном падении количества хрома и никеля, снижении магнезиальности и алмазоносности пород в направлении от центра к периферии провинции. Эти региональные выдержанные геохимические признаки указывают как на существование латеральной зональности в строении кимберлитовой провинции, так и на необходимость обязательного их учёта при определении групп элементов-индикаторов для конкретных перспективных участков. Внутри кимберлитовых полей для каждого кимберлитового тела отмечается их петрогеохимическая индивидуаль-

ность. Сложность и неоднократность процессов становления кимберлитовых диатрем и их геологические условия залегания приводят к формированию совокупности и в итоге дают петрологические и геохимические отличия каждой конкретной трубки. Отмечена также петрологическая и геохимическая индивидуальность кимберлитов интрузивной и эффузивной фаций кимберлитового процесса. Интрузивные кимберлиты выделяются более высокими концентрациями халькофильных элементов, в то время как для пород эксплозивных фаций (кимберлитовые брекчии) характерно преобладание элементов группы Fe и в первую очередь таких, как Cr, Co, Mn и Ti. Эти отличия обусловлены существующими вариациями микроэлементного состава основных петрологических типов кимберлитов.

Необходимо проводить сопоставление таких данных по различным группам мантийных пород, анализ условий их *P-T* равновесия на глубине, пространственного положения в верхней мантии под различными кимберлитовыми полями, соотношений с палеогеотермами. Большой интерес представляет оценка количественной роли различных мантийных парагенезисов в материнских кимберлитах с учётом избирательного захвата глубинного материала протокимберлитовыми расплавами, особенностей транспортировки захваченного материала к поверхности, устойчивости алмазов в глубинных выплавках и др. Иными словами, следует рассмотреть те параметры и процессы, анализ которых может помочь углубить понимание механизмов возникновения продуктивности кимберлитов. Предполагается, что на этой основе удастся усовершенствовать, особенно в количественном отношении по элементному составу, существующие критерии алмазоносности и, соответственно, методы прогнозирования и поисков новых месторождений. Геологоразведочные и прогнозно-поисковые работы на СП в условиях усложняющихся геолого-тектонических обстановок настоятельно требуют повышения степени информативности вещественных характеристик магматических источников алмазов для прогнозно-поисковых и оценочных целей. Изучение отдельных месторождений алмазов АМКП и ДКП в связи с их разведкой и вовлечением в ближайшее время в эксплуатацию и их дальнейшая эксплуатация (Комсомольская, Юбилейная, Удачная, Зарница, трубки НКП и ВМКП), а также пород трубочных и жильных тел и аномальных объектов северной части провинции (в связи с оценкой их потенциальной алмазоносности) вызывает необходимость и представляет возможность совершенствования принципов и критериев минералогическо-петрохимической диагностики промышленно-алмазоносных руд, выделения их основных типов (и фаз),

установления сходства и различия между высокопродуктивными кимберлитами и породами средне- и убогоалмазоносных диатрем.

Имеющийся массив информации по составу вещества верхней мантии под Сибирской алмазоносной провинцией требует переосмысления и анализа с позиций увязки современных представлений о строении и возрасте литосферы с продуктивностью кимберлитовых полей и отдельных трубок. С практической точки зрения, крайне важной выглядит задача разработки количественной модели корреляционных связей алмазоносности кимберлитов с составом глубинных зон, до сих пор не имеющая удовлетворительного решения, несмотря на усилия уже не одного поколения исследователей. В целом проблема взаимоотношений фрагментов мантийного вещества и вмещающих их кимберлитов остаётся в числе стержневых в современной петрологии, поскольку

может пролить дополнительный свет на процессы формирования разнообразных, особо глубинных, расплавов под древними платформами. Большой интерес представляет оценка количественной роли различных мантийных парагенезисов в материнских кимберлитах с учётом избирательного захвата глубинного материала протокимберлитовыми расплавами, особенностей транспортировки захваченного материала к поверхности, устойчивости алмазов в глубинных выплавках и др. Иными словами, следует рассмотреть те параметры и процессы, анализ которых может помочь углубить понимание механизмов возникновения продуктивности кимберлитов. Предполагается, что на этой основе удастся усовершенствовать, особенно в количественном отношении по элементному составу, существующие критерии алмазоносности и, соответственно, методы прогнозирования и поисков новых месторождений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев В. П., Елисеев А. П., Надолинный В. А., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Рылов Г. М., Томиленко А. А., Горайнов С. В., Юрьева О. П., Сонин В. М., Чепуров А. И.* Минералогия и некоторые вопросы генезиса алмазов V и VII разновидностей (по классификации Ю. Л. Орлова) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология. – 2000. – № 5. – С. 79–97.
2. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Логинова А. Н.* Особенности распределения россыпных алмазов, связанных с докембрийскими источниками // Записки Российского минералогического общества. – 2009. – Т. 138, № 2. – С. 1–13.
3. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Тычков С. А.* Проблема алмазоносности Сибирской платформы // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2002. – № 1. – С. 9–36.
4. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н.* Основные литодинамические типы ореолов индикаторных минералов кимберлитов и обстановки их формирования // Геология рудных месторождений. – 1999. – Т. 41, № 3. – С. 281–288.
5. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И.* Полигенез алмазов в связи с проблемой коренных россыпей северо-востока Сибирской платформы // Доклады Академии наук. – 1998. – Т. 361, № 3. – С. 366–369.
6. *Афанасьев В. П., Похиленко Н. П., Логвинова А. М., Зинчук Н. Н., Ефимова Э. С., Сафьянников В. И., Красавчиков В. О., Подгорных М. М., Пругов В. П.* Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 12. – С. 1729–1741.
7. *Богатилов О. А., Кононова В. А., Голубева Ю. Ю., Зинчук Н. Н., Илупин И. П., Ротман А. Я., Левский Л. К., Овчинникова Г. В., Кондрашов И. А.* Петрогеохимические и изотопные вариации состава кимберлитов Якутии и их причины // Геохимия. – 2004. – № 9. – С. 915–939.
8. *Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г.* Геодинамический контроль размещения кимберлитовых полей центральной и северной частей Якутской кимберлитовой провинции (петрохимический аспект) // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2000. – № 3 (9). – С. 37–55.
9. *Горшков А. И., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлистов А. П., Мохов А. В., Сивцов А. В.* Новый упорядоченный смешанослойный минерал лизардит-сапонит из кимберлитов Южной Африки // Доклады РАН. – 2002. – Т. 382, № 3. – С. 374–378.
10. *Егоров К. Н., Зинчук Н. Н., Мишенин С. Г., Серов В. П., Секерин А. П., Галенко В. П., Денисенко Е. П., Барышев А. С., Меньшагин Ю. В., Кошкарев Д. А.* Перспективы коренной и россыпной алмазоносности Юго-Западной части Сибирской платформы // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы Акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения. Дополнительные материалы по итогам региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы геологической отрасли АК «АЛРОСА» и научно-методическое обеспечение их решений», посвящённой 35-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». – Мирный: МГТ, 2003. – С. 50–84.
11. *Зинчук Н. Н.* Сравнительная характеристика вещественного состава коры выветривания кимберлитовых пород Сибирской и Восточно-Европейской платформ // Геология и геофизика. – 1992. – № 7. – С. 99–109.
12. *Зинчук Н. Н., Борис Е. И., Яныгин Ю. Б.* Особенности минерогенеза алмаза в древних осадочных толщах (на примере верхнепалеозойских отложений Сибирской платформы). – М.: МГТ, 2004. – 172 с.

13. *Зинчук Н. Н., Зинчук М. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлистов А. П.* Структурно-кристаллохимические преобразования слоистых минералов на разных стадиях гипергенного изменения кимберлитов // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* – 2002. – № 1. – С. 47–60.
14. *Зинчук Н. Н., Зуев В. М., Коптиль В. И., Чёрный С. Д.* Стратегия ведения и результаты алмазописковых работ // *Горный вестник.* – 1997. – № 3. – С. 53–57.
15. *Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Борис Е. И., Липашова А. Н.* Типоморфизм алмазов из россыпей Сибирской платформы как основа поисков алмазных месторождений // *Руды и металлы.* – 1999. – № 3. – С. 18–33.
16. *Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Горшков А. И.* Идентификация и генезис лизардит-сапонитового смешанослойного образования в кимберлитах одной из трубок Южной Африки // *Литология и полезные ископаемые.* – 2003. – № 1. – С. 87–96.
17. *Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Соколов В. Н.* Изменение минерального состава и структурных особенностей кимберлитов Якутии в процессе выветривания // *Геология и геофизика.* – 1982. – № 2. – С. 42–53.
18. *Зинчук Н. Н., Мельник Ю. М., Серенко В. П.* Апокимберлитовые породы // *Геология и геофизика.* – 1987. – № 10. – С. 66–72.
19. *Зинчук Н. Н., Савко А. Д., Крайнов А. В.* Кимберлиты в истории Земли // *Труды НИИ геологии ВГУ.* – Воронеж: ВГУ, 2013. – Вып. 68. – 100 с.
20. *Зинчук Н. Н., Спеццус З. В., Зуенко В. В., Зуев В. М.* Кимберлитовая трубка Удачная. Вещественный состав и условия формирования. – Новосибирск: НГУ, 1993. – 147 с.
21. *Зинчук Н. Н., Борис Е. И., Стегницкий Ю. Б.* Структурно-формационное и минерагеническое районирование территорий развития погребенных кор выветривания и продуктов их переотложения в алмазоносных регионах (на примере Якутской кимберлитовой провинции) // *Геология и геофизика.* – 1998. – Т. 39, № 7. – С. 950–964.
22. *Квасница В. Н., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И.* Типоморфизм микрокристаллов алмаза. – М.: Недра, 1999. – 224 с.
23. *Костровицкий С. И., Яковлев Д. А., Спеццус З. В.* Неоднородность литосферной мантии под северными полями Якутской провинции и алмазоносность кимберлитов // *Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические, инновационно-технологические пути её повышения. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ–НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО).* – Мирный: МГТ, 2018. – С. 114–118.
24. *Котельников Д. Д., Домбровская Ж. В., Зинчук Н. Н.* Основные закономерности выветривания силикатных пород различного химического и минералогического типа // *Литология и полезные ископаемые.* – 1995. – № 6. – С. 594–601.
25. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Об аномалии общей схемы преобразования разбухающих глинистых минералов при погружении содержащих их отложений в стратисферу // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология.* – 2003. – № 2. – С. 57–68.
26. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Особенности глинистых минералов в отложениях различных осадочных формаций // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* – 1997. – № 2. – С. 53–63.
27. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Типоморфные особенности и палеогеографическое значение слюдистых минералов // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* – 1996. – № 1. – С. 53–61.
28. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Условия накопления и постседиментационного преобразования глинистых минералов в осадочном чехле земной коры // *Вестник Воронежского университета. Геология.* – 2001. – № 12. – С. 45–51.
29. *Мацюк С. С., Зинчук Н. Н.* Оптическая спектроскопия минералов верхней мантии. – М.: Недра, 2001. – 428 с.
30. *Савко А. Д., Зинчук Н. Н., Шевырёв Л. Т., Ильяш В. В., Афанасьев Н. С.* Алмазоносность Воронежской антеклизы // *Труды НИИГ Воронежского ун-та.* – 2003. – Т. 17. – 121 с.
31. *Симоненко В. И., Толстов А. В., Васильева В. И.* Новый подход к геохимическим поискам кимберлитов на закрытых территориях // *Разведка и охрана недр.* – 2008. – № 4–5. – С. 108–112.
32. *Харькив А. Д., Зуенко В. В., Зинчук Н. Н.* и др. Петрохимия кимберлитов. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
33. *Хитров В. Г., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д.* Применение кластер-анализа для выяснения закономерностей выветривания пород различного состава // *Доклады АН СССР.* – 1987. – Т. 296, № 5. – С. 1228–1233.
34. *Grachanov S. A., Zinchuk N. N., Sobolev N. V.* The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Siberian platform // *Doklady Earth Sciences.* – 2015. – V. 465, № 2. – P. 1297–1301.
35. *Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya.* Mantle Sources of the kimberlite Volcanism of the Siberian Platform // *Petrology.* – 2001. – V. 9, № 6. – P. 576–588.
36. *Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Volkova N. I. et al.* Diamond potential estimation based on Kimberlite major element chemistry // *Journal of Geochemical Exploration.* – 2002. – V. 76, № 2. – P. 93–112.

## REFERENCES

1. *Afanasyev V. P., Yeliseyev A. P., Nadolinnyu V. A., Zinchuk N. N.* et al. Mineralogiya i nekotoryye voprosy genezisaalmazov V i VII raznovidnostey (po klassifikatsii Yu. L. Orlova) [Mineralogy and some questions of the genesis of diamonds of V and VII varieties (according to the classification of Yu. L. Orlov)]. *Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Seriya Geologiya*, 2000, No. 5, P. 79–97. (In Russ.)
2. *Afanasyev V. P., Zinchuk N. N., Loginova A. N.* Osobennosti raspredeleniya rossypanykhalmazov, svyazannykh s dokembriyskimi istochnikami [Features of the distribution of placer diamonds associated with Precambrian sources].

- Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva, 2009, V. 138, No. 2, P. 1–13. (In Russ.)
3. *Afanasyev V.P., Zinchuk N.N., Tychkov S.A.* Problema almazonosnosti Sibirskoy platformy [The problem of diamond content of the Siberian platform]. Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta, Geologiya, 2002, No. 1, P. 19–36. (In Russ.)
  4. *Afanasyev V.P., Zinchuk N.N.* Osnovnyye litodinamicheskiye tipy oreolov indikatornykh mineralov kimberlitov i obstanovki ikh formirovaniya [The main lithodynamic types of halos of indicator minerals of kimberlites and the setting of their formation]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 1999, V. 41, No. 3, P. 281–288. (In Russ.)
  5. *Afanasyev V.P., Zinchuk N.N., Koptil V.I.* Poligenez almazov v svyazi s problemoy korennykh rossypey severovostoka Sibirskoy platformy [Polygenesis of diamonds in connection with the problem of bedrock placers in the northeastern Siberian platform]. Doklady Akademii nauk, 1998, V. 361, No. 3, P. 366–369. (In Russ.)
  6. *Afanasyev V.P., Pokhilenko N.P., Logvinova A.M., Zinchuk N.N., Yefimova E.S., Safyannikov V.I., Krasavchikov V.O., Podgornyykh M.M., Prugov V.P.* Osobennosti morfologii i sostava nekotorykh khromshpinelidov almazonosnykh ploshchadey v svyazi s problemoy “lozhnykh” indikatorov kimberlitov [Peculiarities of morphology and composition of some chrome-spinels of diamond-bearing areas in connection with the problem of “false” indicators of kimberlites]. Geologiya i geofizika, 2000, V. 41, No. 12, P. 1729–1741. (In Russ.)
  7. *Bogatikov O.A., Kononova V.A., Golubeva Yu. Yu., Zinchuk N.N.* et al. Petrogeokhimicheskiye i izotopnyye variatsii sostava kimberlitov Yakutii i ikh prichiny [Petrogeochemical and isotopic variations in the composition of kimberlites of Yakutia and their causes]. Geokhimiya, 2004, No. 9, P. 915–939. (In Russ.)
  8. *Vasilenko V.B., Zinchuk N.N., Kuznetsova L. G.* Geodinamicheskiy kontrol razmeshcheniya kimberlitovykh poley tsentralnoy i severnoy chastey Yakutskoy kimberlitovoy provintsii (petrokhimicheskiy aspekt) [Geodynamic control of the location of kimberlite fields in the central and northern parts of the Yakutsk kimberlite province (petrochemical aspect)]. Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta, Geologiya, 2000, No. 3 (9), P. 37–55. (In Russ.)
  9. *Gorshkov A.I., Zinchuk N.N., Kotelnikov D.D., Shlykov V.G., Zhukhlistov A.P., Mokhov A.V., Sivtsov A.V.* Novyy uporyadochennyy smeshanosloynny mineral lizardit-saponit iz kimberlitov Yuzhnoy Afriki [New ordered mixed-layer lizardite-saponite mineral from kimberlites South Africa]. Doklady RAN, 2002, V. 382, No. 3, P. 374–378. (In Russ.)
  10. *Yegorov K.N., Zinchuk N.N., Mishenin S.G., Serov V.P., Sekerin A.P., Galenko V.P., Denisenko Ye.P., Baryshev A.S., Menshagin Yu.V., Koshkarev D.A.* Perspektivy korennoy i rossypnoy almazonosnosti Yugo-Zapadnoy chasti Sibirskoy platformy [Prospects for the primary and alluvial diamond content of the Southwestern part of the Siberian platform]. Digest Geologicheskkiye aspekty mineralno-syr'yevoy bazy Aktsionernoy kompanii “ALROSA”: sovremennoye sostoyaniye, perspektivy, resheniya. Dopolnitelnyye materialy po itogam regionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktualnyye problemy geologicheskoy otrasli AK “ALROSA” i nauchno-metodicheskoye obespecheniye ikh resheniy», posvyashchennoy 35-letiyu YANIGP TSNIGRI AK «ALROSA». Mirnyy, MGT publ., 2003, P. 50–84. (In Russ.)
  11. *Zinchuk N.N.* Sravnitel'naya kharakteristika veshchestvennogo sostava kory vyvetrivaniya kimberlitovykh porod Sibirskoy i Vostochno-Yevropeyskoy platform [Comparative characteristics of the material composition of the weathering crust of kimberlite rocks of the Siberian and East European platforms]. Geologiya i geofizika, 1992, No. 7, P. 99–109. (In Russ.)
  12. *Zinchuk N.N., Boris Ye.I., Yanygin Yu. B.* Osobennosti mineragenii almaza v drevnikh osadochnykh tolshchakh (na primere verkhnepaleozoyskikh otlozheniy Sibirskoy platformy) [Peculiarities of diamond minerageny in ancient sedimentary strata (on the example of the Upper Paleozoic deposits of the Siberian platform)]. Moscow, MGT publ., 2004, 172 p. (In Russ.)
  13. *Zinchuk N.N., Zinchuk M.N., Kotelnikov D.D., Shlykov V.G., Zhukhlistov A.P.* Strukturno-kristallokhimicheskiye preobrazovaniya sloistyykh mineralov na raznykh stadiyakh gipergennogo izmeneniya kimberlitov [Structural-crystal-chemical transformations of layered minerals at different stages of hypergene alteration of kimberlites]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka, 2002, No. 1, P. 47–60. (In Russ.)
  14. *Zinchuk N.N., Zuyev V.M., Koptil V.I., Chornyy S.D.* Strategiya vedeniya i rezultaty almazoposkovykh rabot [Strategy of conducting and results of diamond prospecting works]. Gornyy vestnik, 1997, No. 3, P. 53–57. (In Russ.)
  15. *Zinchuk N.N., Koptil V.I., Boris Ye.I., Lipashova A.N.* Tipomorfizm almazov iz rossypey Sibirskoy platformy kak osnova poiskov almaznykh mestorozhdeniy [Typomorphism of diamonds from placers of the Siberian platform as a basis for prospecting for diamond deposits]. Rudy i metally, 1999, No. 3, P. 18–30. (In Russ.)
  16. *Zinchuk N.N., Kotelnikov D.D., Gorshkov A.I.* Identifikatsiya i genezis lizardit-saponitovogo smeshanosloynnogo obrazovaniya v kimberlitakh odnoy iz trubok Yuzhnoy Afriki [Identification and genesis of lizardite-saponite mixed-layer formation in kimberlites of one of the pipes of South Africa]. Litologiya i poleznyye iskopayemyye, 2003, No. 1, P. 87–96. (In Russ.)
  17. *Zinchuk N.N., Kotelnikov D.D., Sokolov V.N.* Izmeneniye mineralnogo sostava i strukturnykh osobennostey kimberlitov Yakutii v protsesse vyvetrivaniya [Change in the mineral composition and structural features of the kimberlites of Yakutia in the process of weathering]. Geologiya i geofizika, 1982, No. 2, P. 42–53. (In Russ.)
  18. *Zinchuk N.N., Melnik Yu.M., Serenko V.P.* Apokimberlitovyye porody [Apokimberlite rocks]. Geologiya i geofizika, 1987, No. 10, P. 66–72. (In Russ.)
  19. *Zinchuk N.N., Savko A.D., Kraynov A.V.* Kimberlity v istorii Zemli [Kimberlites in the history of the Earth]. Trudy NII geologii VGU, Is. 68, Voronezh, VGU publ., 2013, 99 p. (In Russ.)
  20. *Zinchuk N.N., Spetsius Z.V., Zuyenko V.V., Zuyev V.M.* Kimberlitovaya trubka Udachnaya. Veshchestvennyy sostav

- i usloviya formirovaniya [Udachnaya kimberlite pipe. Substance composition and conditions of formation]. Novosibirsk, NGU, 1993, 147 p. (In Russ.)
21. *Zinchuk N.N., Boris Ye. I., Stegnitskiy Yu. B.* Strukturno-formatcionnoye i mineragenicheskoye rayonirovaniye territoriy razvitiya pogrebennykh kor vyvetrivaniya i produktov ikh pereotlozheniya v almazonosnykh regionakh (na primere Yakutskoy kimberlitovoy provintsii) [Structural-formational and mineragenic zoning of the territories of development of buried weathering crusts and products of their redeposition in diamond-bearing regions (on the example of the Yakut kimberlite province)]. *Geologiya i geofizika*, 1998, V. 39, No. 7, P. 950–964. (In Russ.)
  22. *Kvasnitsa V.N., Zinchuk N.N., Koptil V.I.* Tipomorfizm mikrokrystallov almaza [Typomorphism of diamond microcrystals]. Moscow, Nedra publ., 1999, 224 p. (In Russ.)
  23. *Kostrovitskiy S.I., Yakovlev D.A., Spetsius Z.V.* Neodnorodnost litosfernoy mantii pod severnymi polyami Yakutskoy provintsii i almazonosnost kimberlitov [Heterogeneity of the lithospheric mantle under the northern fields of the Yakutsk province and the diamond content of kimberlites]. *Digest Effektivnost geologorazvedochnykh rabot na almazy: prognozno-resursnyye, metodicheskiye, innovatsionno-tehnologicheskiye puti yeyo povysheniya. Materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu Almaznoy laboratorii TSNIGRI–NIGP AK "ALROSA" (PAO).* Mirnyy, MGT publ., 2018, P. 114–118. (In Russ.)
  24. *Kotelnikov D.D., Dombrovskaya Zh. V., Zinchuk N.N.* Osnovnyye zakonomernosti vyvetrivaniya silikatnykh porod razlichnogo khimicheskogo i mineralogicheskogo tipa [Main regularities of weathering of silicate rocks of various chemical and mineralogical types]. *Litologiya i poleznyye iskopayemye*, 1995, No. 6, P. 594–601. (In Russ.)
  25. *Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N.* Ob anomalii obshchey skhemy preobrazovaniya razbukhayushchikh glinistykh mineralov pri pogruzhenii soderzhashchikh ikh otlozheniy v stratisferu [About the anomaly of the general scheme of the swelling clay minerals transformation during the immersion of sediments containing them into the stratisphere]. *Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Seriya geologiya*, 2003, No. 2, P. 57–68. (In Russ.)
  26. *Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N.* Osobennosti glinistykh mineralov v otlozheniyakh razlichnykh osadochnykh formatsiy [Peculiarities of clay minerals in deposits of various sedimentary formations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1997, No. 2, P. 53–63. (In Russ.)
  27. *Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N.* Tipomorfnyye osobennosti i paleogeograficheskoye znachenie slyudistykh mineralov [Typomorphic features and paleogeographic significance of micaceous minerals]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1996, No. 1, P. 53–61. (In Russ.)
  28. *Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N.* Usloviya nakopleniya i postsedimentatsionnogo preobrazovaniya glinistykh mineralov v osadochnom chekhle zemnoy kory [Conditions of accumulation and postsedimentary transformation of clay minerals in the sedimentary cover of the earths crust]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2001, No. 12, P. 45–51. (In Russ.)
  29. *Matsyuk S.S., Zinchuk N.N.* Opticheskaya spektroskopiya mineralov verkhney mantii [Optical spectroscopy of minerals of the upper mantle]. Moscow, Nedra publ., 2001, 428 p. (In Russ.)
  30. *Savko A.D., Zinchuk N.N., Shevyrov L.T., Ilyash V.V., Afanasyev N.S.* Almazonosnost Voronezhskoy anteklizy [Diamond potential of the Voronezh antecline]. *Trudy NIIG Voronezhskogo un-ta*, 2003, V. 17, 121 p. (In Russ.)
  31. *Simonenko V.I., Tolstov A.V., Vasilyeva V.I.* Novyy podkhod k geokhimicheskim poiskam kimberlitov na zakrytykh territoriyakh [A new approach to geochemical prospecting for kimberlites in closed areas]. *Razvedka i okhrana*, 2008, No. 4–5, P. 108–112. (In Russ.)
  32. *Kharkiv A.D., Zuyenko V.V., Zinchuk N.N. et al.* Petrokhimiya kimberlitov [Petrochemistry of kimberlites]. Moscow, Nedra publ., 1991, 304 p. (In Russ.)
  33. *Khitrov V.G., Zinchuk N.N., Kotelnikov D.D.* Primeniye klaster-analiza dlya vyyasneniya zakonomernostey vyvetrivaniya porod razlichnogo sostava [Application of cluster analysis to elucidate the regularities of weathering of rocks of different composition]. *Doklady AN SSSR*, 1987, V. 296, No. 5, P. 1228–1233. (In Russ.)
  34. *Grachanov S.A., Zinchuk N.N., Sobolev N.V.* The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Siberian platform. *Doklady Earth Sciences*, 2015, V. 465, No. 2, P. 1297–1301.
  35. *Serov I.V., Garanin V.K., Zinchuk N.N., Rotman A. Ya.* Mantle Sources of the kimberlite Volcanism of the Siberian Platform. *Petrology*, 2001, V. 9, No. 6, P. 576–588.
  36. *Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Volkova N.I. et al.* Diamond potential estimation based on Kimberlite major element chemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 2002, V. 76, No. 2, P. 93–112.