

## О геохимических особенностях разновозрастных образований алмазоперспективных территорий

Охарактеризованы особенности геохимического состояния магматических, вулканогенно-осадочных и осадочных пород, а также минералов и их ассоциаций в алмазоперспективных регионах. Показано, что процессы вторичного и гипергенного минералообразования проходили в большом интервале температур и при вызванном их спадом изменении реакции среды: от щелочной к кислой с последующей нейтрализацией, что зафиксировалось в форме растворения, дорастания и возникновения новых генераций вторичных минералов и чётко отразилось на геохимических особенностях пород. Большое внимание уделено петролого-минералогическим и геохимическим характеристикам кимберлитовых пород с различной продуктивностью, а также различной степени изменения. Высказаны предположения о зональности литосферной мантии кимберлитовой провинции и её алмазоносных территорий, а также даны рекомендации по проведению прогнозно-поисковых работ на алмазы.

*Ключевые слова:* кимберлиты, постмагматические и гипергенные процессы, вторичные минералы, 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

## Geochemical features of non-coeval formations in diamond-promising territories

N. N. ZINCHUK

Chairman of West-Yakutian Scientific Centre (WYSC) of Republic Sakha (Yakutia) Academy of Sciences, Mirny

Characteristic features of the geochemical state are described of magmatic, volcanosedimentary, and sedimentary rocks, as well as of minerals and mineral assemblages, distributed in diamond-promising regions. It is shown that processes of the secondary and supergene mineral formation occurred in a wide range of temperatures and of the environment reaction changes from alkaline to acid state with subsequent neutralization due to the temperature decline, which was recorded in the forms of mineral dissolution and overgrowth and in appearance of new generations of secondary minerals and had a clear effect on the geochemical features of the rocks. Much attention is paid to the petrological, mineralogical, and geochemical characteristics of kimberlitic rocks with different in the productivity and alteration degree. Assumptions are made as to a zonality of the lithospheric mantle of the kimberlite province and to its diamond-bearing territories, and recommendations are given for the diamond forecasting and prospecting.

*Key words:* kimberlites, postmagmatic and supergene processes, secondary minerals, petrological and mineralogical characteristics, geochemistry, diamond-bearing provinces.

**Введение.** За последние несколько десятилетий опубликовано значительное количество работ по геохимии отдельных элементов [4, 8–10, 12, 15, 18, 20], а также петрохимии кимберлитов, лампроитов и конвергентных им пород [1–3, 5–7, 14, 19], изученных в различных алмазоносных районах Сибирской (СП), Восточно-Европейской (ВЕП), Южно-Африканской (ЮАП) платформ и других перспективных на алмазы территорий. Магматические образования широко распространены на рассматриваемых территориях и представлены

породами среднепалеозойского и мезозойского комплексов, различающимися не только по возрасту, но и петрохимическому составу, формам и условиям проявления. Среднепалеозойский магматический комплекс представлен интрузивными породами кимберлитовой и трапповой формаций. Породы основного состава установлены в виде интрузий и покровов долеритов, залегающих на различных глубинах. К ним относятся [1–4, 8, 10] недифференцированные и слабодифференцированные тела долеритов и габбро-долеритов,

внедрившиеся в нижние горизонты карбонатных пород раннего палеозоя. В центральной части и на севере Малоботубинского района (МБАР) Якутской алмазонасной провинции (ЯАП) известны трубки взрыва пород основного состава, а также не выходящие на дневную поверхность среднепалеозойские дайковые тела долеритов, картируемые по геолого-геофизическим данным. В ЯАП известны [4] свыше тысячи тел кимберлитовых и кимберлитоподобных пород различного морфологического типа (трубки, жилы, дайки, силлы и штоки), пространственно расположенных в следующих обособленных алмазонасных районах: МБАР, Далдыно-Алакитский (ДААР), Среднемархинский (СМАР), Муно-Тюнгский (МТАР), Приленский (ПАР), Оленёкский (ОАР), Анабарский (ААР) и Центрально-Алданский или Южно-Якутский (ЦААР). Внутри этих районов локализованы 24 рудных поля кимберлитов, среди которых промышленное значение имеют коренные месторождения в составе МБАР (Мирнинское поле), ДААР (Далдынское и Алакит-Маринское), МТАР (Верхнемунское) и СМАР (Накынское). Кимберлитовые поля представляют собой пространственно сближенные группы и отдельные кимберлитовые тела, обычно близкие по возрасту, сходные между собой по вещественному составу и алмазонасности и обладающие признаками сродства по близости структурно-тектонических условий своего формирования. Структуры кимберлитовых полей сугубо индивидуальны, зависят от совокупности региональных тектонических особенностей и специфики истории геологического развития каждого конкретного кимберлитонасного района: это – мощности и структуры осадочного чехла, возраст, глубины заложения магматических очаговых систем, зон глубинных разломов, степень и интенсивность тектонической нарушенности кристаллических пород фундамента и платформенного чехла, палеогеографические условия сохранности кимберлитовых тел и подчинённость их элементам неотектоники. Границы полей обычно условные и проводятся по положению крайних кимберлитовых тел. Морфология полей также условная, видоизменяющая свой облик при открытии новых тел, но и в целом близкая к изометричным или линейно-вытянутым формам. Вытянутость соответствует генеральному простираю осевых линий, рудоконтролирующих зон и вмещающих глубинных разломов. Площадь кимберлитовых полей колеблется

от 28,5 (Верхнемунское) до 1000 км<sup>2</sup> и более. Расположение кимберлитовых тел в структуре рудного поля носит обычно линейный или групповой характер, что предопределяет формирование кустов тел из 3–5 и более диатрем. Примечательно, что каждый такой куст обладает [4, 15] признаками петрологического сходства, минерального и химического состава, а также алмазонасности. Особое внимание привлекают так называемые трубки-лидеры, представляющие собой коренные алмазные месторождения, имеющие наиболее крупные в поле размеры, состоящие из 1–2 и более рудных столбов, сформированных в несколько этапов и фаз и сложенных различными петрографическими разностями с варьирующим минералого-геохимическим составом и различным уровнем алмазонасности. Так, например, месторождение трубки Удачная состоит [11, 13, 16] из двух рудных тел трубчатого типа, имеющих собственные элементы склонения (падения), близкие изометричные формы, но состоящие из разных типов кимберлитовых пород. Рудные тела восточного и западного тел трубки Удачная осложнены внедрением до-, син- и посттрубчатых систем жильных тел и даек кимберлитов, а также двух мелких «слепых» кимберлитовых тел-сателлитов трубчатого типа, установленных в разрезе пород нижнего палеозоя на удалении более 250–350 м от основного рудного столба восточного тела диатремы. Аналогичным образом можно рассматривать и структурный план диатремы Мир, сопровождающейся трубкой Спутник, строение которых также осложнено существованием жильных и даечных тел кимберлитов. Близкие характеристики достаточно сложного строения имеют коренные месторождения трубок Айхал, Интернациональная, Ботубинская, Амакинская и др. [21–26]. Это позволяет предполагать, что каждое более-менее крупное коренное месторождение алмазов в структурном плане представляет собой миникуст из разновозрастных кимберлитовых тел, обладающих не только элементами генетического сродства и сходства, но и свидетельствующих о возможности существования 1–2 магмоподводящих каналов, а процесс их становления может рассматриваться как явление «канал в канале», когда в периоды вулканической активизации, кимберлитовый расплав каждой последующей фазы использует уже структурно подготовленные пути подъёма в верхние горизонты перекрывающего разреза [27, 28]. Каждая такая сложностроенная

система представляет собой миникуст из нескольких пространственно сближенных рудных тел кимберлитов различного морфогенетического типа.

**Фактический материал, результаты исследований и их интерпретация.** Алмазоносные кимберлитовые поля СП (МКП, НКП, АМКП, ДКП и ВМКП) формируют [29, 32] южную часть ЯАП, выделяемую по петрохимическим, минералогическим, геохимическим и возрастным особенностям в составе Вилуйской субпровинции. Морфология рудных тел кимберлитов представлена трубками, жилами и дайками, реже штоками, сложенными порфиоровыми кимберлитами (ПК) и кимберлитовыми брекчиями (КБ), отличающимися наличием выраженной геохимической специализации, достаточно контрастной по отношению к родственным им щелочно-базальтоидным породам. Выражено это в обогащении кимберлитов Cr, Ni и Co при более низком уровне концентраций Zr и Mn. Кимберлиты ЯАП при этом характеризуются относительно невысокими содержаниями щелочей. В сравнении с ультраосновными породами для кимберлитов ЯАП показательно возрастание количества Zr, Nb, Ge, La, Pb и Sr при резком преобладании K над Na [30, 31, 33]. По отношению к лампроитам в кимберлитах выше уровень содержания окислов Ti, K, P, F, но ниже Mg, Ca и CO<sub>2</sub>. Геохимическая специализация кимберлитов заключается [34–37] в необычном сочетании элементов сидерофильной группы (Cr, Ni, Co, Sc) с редкими рассеянными и радиоактивными литофильными элементами (Nb, Zr, Rb, Sr, Ba, Th, U). Обогащённость литофильными элементами относительно мантийных гранатовых перидотитов в кимберлитах и лампроитах достигает от 5–50 до 200 и выше. По сравнению с микроэлементным составом хондритов и щелочных пород других типов кимберлиты отличаются высокой концентрацией тяжёлых редкоземельных элементов и относительным обогащением лёгкими редкоземельными.

*Петрохимические* отличия кимберлитов достаточно чётко проявляются [1–4, 8, 10, 15, 20] при сравнении их с другими типами пород. Поведение доминирующих окислов и элементов особенно чётко регулирует отличительные геохимические черты петрологических разновидностей кимберлитов взрывной и интрузивной фаз внедрения. Автолитовые кимберлитовые брекчии (АКБ) отличаются от КБ с массивной текстурой цемента по содержанию CaO, MgO, H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>. Для боль-

шинства редких элементов более высокий уровень концентрации отмечен у КБ. Проявление признаков геохимической специализации находит своё отражение и в структуре кимберлитовых полей, что выражено в петрохимических характеристиках кимберлитов. Например, кимберлиты Вилуйской субпровинции отличаются [9, 11, 12, 16, 18] от однотипных пород северных территорий (Оленёкская субпровинция) более низкими содержаниями окислов Ti, Al, Fe, K, P и по значениям разного рода петрохимических показателей (Si/Mg, Mg/Fe и др.). В результате системных исследований установлены признаки латеральной геохимической зональности в распределении содержаний доминирующих окислов и малых элементов в составе кимберлитов Сибирской платформы. Выражены они в обогащении щелочами, железом, титаном при одновременном снижении магнезиальности и алмазоносности кимберлитовых пород в направлении от центра к периферии провинции. Аналогичные закономерности в дифференциации состава кимберлитов фиксируются и внутри рудных полей кимберлитов. Так, в пределах ДААР определено, что трубки периферии отличаются от центральных частей максимальным значением степени окисленности пород (Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>), повышенными содержаниями Ni, P и суммы Fe. Аналогичные исследования проведены также на примере МКП, АМКП, ДКП и ВМКП. Признаки её существования зафиксированы и для НКП. При этом отмечено, что существование зональности является отражением единой схемы геохимической дифференциации кимберлитовой магмы от центра очаговой системы к периферии как в плане провинции, так и по эпохам кимберлитового магматизма. В частности, по уровню содержаний индикаторных элементов определена тенденция падения во времени концентрации Cr, Ni и Co при одновременном росте значений сумм Mn, Ti и V.

Эти вариации носят выдержанный характер по исследованным полям кимберлитопоявления и обнаруживают свойства цикличности, иногда коррелируемой с уровнем продуктивности [39–41].

В связи с началом освоения *Архангельской алмазоносной провинции* (ААП) на ВЕП актуальным явилось [4, 8–10, 14–16] изучение природной составляющей геохимической специализации территории. Геохимическими исследованиями, проведёнными в пределах *Зимнебережного алмазоносного района* (ЗБАР), подтверждено, что проявления

кимберлитового магматизма отображаются в геохимическом поле в виде специфических первичных и вторичных биогеохимических ореолов широкого спектра элементов. Основными элементами-индикаторами являются Cr, Ni, Co, Zr, Li, Cu, Ba, Nb, Ti, Sr, Ga, Sc, V и Mn. Для алмазоносных разновидностей кимберлитов типоморфными являются Cr и Ni. Слабоалмазоносные кимберлиты характеризуются повышенными содержаниями Zr, Ti, Cu, Ba, Sc, Nb, Sr, Ga, V и В. Специфической особенностью кимберлитов ВЕП является их обогащение редкоземельными элементами, причём содержание их в трубках значительно (на 1–2 порядка) выше, и поэтому отдельные кимберлитовые тела сопровождаются сложного состава лито-гидрохимическими потоками рассеяния типоморфных элементов различной протяжённости и контрастности. Наиболее информативен гидрохимический метод поисков, а менее информативными являются биогеохимические и литохимические приёмы по потокам рассеяния. В результате анализа статистических параметров распределения элементов-индикаторов (среднее содержание, среднеквадратичные отклонения, кларки концентрации, стандарты и др.) установлено, что все литохимические разновидности кимберлитов ЗБАР в целом характеризуются постоянством микрокомпонентного состава. Отличительной их чертой является [2–4, 8, 10, 15, 20] значительная обогащённость относительно осадочных пород Co, Ni, Cr, в меньшей степени Cu, Zn, Ba, Pb, Mn, V, Sn и существенная обеднённость Ti, Zr и Yt. Это в полной мере соответствует магматогенной и ксеногенной специализации кимберлитовых пород региона. Корреляционный анализ средних содержаний кимберлитовых пород ЗБАР позволил установить, что практически все исследуемые элементы в кимберлитах образуют сложное корреляционное ядро, в составе которого отмечены Ni, Co, Cr, Zn, Cu, V и Zr. Отличительной чертой является отсутствие между анализируемыми элементами отрицательных связей.

Кимберлиты *трубки им. В. Гриба из Верхотинского поля* тяготеют [4] на геохимических диаграммах к группе кимберлитов Золотицкого поля. Это сходство обусловлено высокой магнизиальностью сравниваемых пород, поскольку в этой области составов геохимические различия кимберлитов разных групп нивелируются. Автолитовый кимберлит этой трубки насыщен ксеногенным мантийным материалом (пироп, пикроильменит,

хромдиопсид и др.), от которого полностью трудно избавиться при подготовке образцов к анализам. На дискриминантной диаграмме  $TiO_2-K_2O$  кимберлиты Золотицкого поля и Терского берега лежат на тренде слюдяных кимберлитов, для которого характерны вариации содержания  $K_2O$  при относительно невысоких концентрациях  $TiO_2$ . Судя по распределению порообразующих оксидов, большинство некантаминированных кимберлитов северной окраины ВЕП относятся к типу неслюдяных (с малым количеством слюды) кимберлитов. Кимберлиты Золотицкого поля и трубки им. В. Гриба относительно обеднены Nb, Zr, Ta, Hf, Th и U, концентрации которых обычно не превышают соответственно 70, 160, 3, 5, 4, 5 и 1 г/т. В отличие от этого, в кимберлитах Среднего Тимана и Кепинского поля ААП содержания этих элементов заметно выше и соответственно составляют 100–180, 120–350, 5–13, 3,5–8, 8–14 и 2,5–6 г/т. Исследователями кимберлитов ВЕП сделан вывод о необходимости разработки для этих пород своей петролого-геохимической классификации с выделением их в особую группу кимберлитов, отличающихся от аналогичных образований СП и ЮАП. Возможно, эти отличия связаны с особенностями глубинного строения земной коры и верхней мантии в пределах ВЕП, а также с различными условиями генерации и эволюции кимберлитовых расплавов. При проведении дополнительных исследований необходимо найти своё место в системе петролого-геохимических характеристик кимберлитовым породам высокоалмазоносной трубки им. В. Гриба, резко отличающейся по минералам тяжёлой фракции, их набору и количественным соотношениям мегакристаллов от кимберлитов Золотицкого поля ААП.

Важными для общей вещественной характеристики перспективных территорий являются данные о *геохимии трапповых образований*, широко развитых во многих алмазоносных районах СП. Проявлен трапповый магматический комплекс недифференцированными и слабодифференцированными интрузиями – пластовыми телами (силлами), пологосекущими интрузиями, реже дайками и штокверками, внедрившимися в терригенные толщи, нередко прорывая последние. Представлены такие магматические образования [5] долеритами, габбродолеритами и толеитовыми базальтами. Размеры интрузий изменчивы как по площади проявления (от первых до сотен км<sup>2</sup>), так и по мощности (от 5 до 200 и более метров).

Наряду с интрузиями отмечаются дайки мощностью до 50 м, реже силлы (до 70 м), сложенные субщелочными основными породами. Геохимия и рудогенез базитов СП изучены достаточно глубоко в связи с их рудогенерирующей ролью в медно-никелевых, свинцово-цинковых, железорудных, медных проявлениях и месторождениях исландского шпата, а также при совершенствовании геолого-геофизических методов поисков алмазных месторождений, открытых на многих таких территориях. Для всех изученных трапповых интрузий СП характерна близость их петрохимического и геохимического составов. В целом в таких породах Тунгусской субпровинции (ТСП) доминируют Zn, V, Cr, Ni, Sr и Ga. Структура корреляционных связей микроэлементов показывает тенденцию к формированию сразу нескольких парагенетических ассоциаций: Li–Ag–Ba, Sc–Cr–Ni–Ga, Ti–Nb, V–Ni–Sn, Cr–Ga, Co–Ni, Cu–Nb, Ga–Nb, Cu–Ag–Sn и др. Для данного типа пород характерны высокие значения дисперсии содержаний V, Cr, Sc, Sr, Mn, Ni и Zn. В отличие от этих пород, для более поверхностных образований, присущих траппам Ангаро-Виллюйской субпровинции (АВСП), свойственны более высокие содержания Cr, Co, Ni и V. При этом роль халькофильных элементов (Sc и Zn) незначительна и переменчива. Площадное развитие интрузий долеритов ТСП и АВСП предопределяет их существенное влияние на параметры регионального геохимического фона, что необходимо учитывать при геохимическом районировании этих территорий. В каждом конкретном случае в зависимости от типа и фациальной принадлежности траппов, характера их взаимоотношений с вмещающими породами фиксируется проявление индивидуальных отличий крупных интрузий. Так, секущие и пластовые тела Улардахской и Эрбэйэкской интрузий залегают среди терригенно-карбонатных пород кембрия. В силу эндогенного и постмагматического воздействия траппов раннепалеозойские отложения испытали преобразования и характеризуются относительным накоплением таких малых элементов, как V, Ni, Mo и Pb. Менее контрастно происходит увеличение содержаний Ga, Cr, Co, Mn, Zn и Sn. Специфический состав имеет и группа элементов с высокими значениями дисперсии – Ti, V, Cr, Co, Sc и Mn. Индивидуальны парагенетические ассоциации взаимокоррелируемых микроэлементов: Li–V–Ti–Sc–Cr–Ni–Ga–Zr и Ni–Ga–Zr. Постмагматическое воздей-

ствии Алымджахской и Олгуйдахской пластовых интрузий, прорывающих образования ордовика, выражено в накоплении Zn, к которому тяготеют Zr, Yb, Sc, V, Mo, Nb и Co. Высокая степень дисперсии содержания установлена для Co, Ti, V, Cr, Cu и Mn. Состав микроэлементных ассоциаций имеет следующий вид: Li–Sc–Ti–V–Cr–Ni–Ga–Sn и Cu–Ga–Ag–Sn–Ni–Zr. В свою очередь, Лахарчано-Батырская и Сянская трапповые интрузии, прорывающие терригенно-карбонатные породы ордовика и силура, привели к слабому накоплению в раннепалеозойском разрезе Ti, Sc, Y, Mo, Ba и Sr, являющихся типоморфными элементами траппового магматизма. Высокие дисперсии содержаний в данном случае наблюдаются в распределении Sr, Ba, Ti, Co, V и Mn, а парагенетические ассоциации имеют следующий вид: V–Cr–Ga–Y–Ag, Cr–Ga–Y–Ag–Ba, Ni–Ga–Zr. Приведённые данные свидетельствуют о достаточно выдержанном составе геохимических особенностей траппового магматизма, хотя и показывают специфические черты при внедрении в разновозрастные осадочные нижнепалеозойские толщи. Знание этих особенностей необходимо учитывать при проведении палеогеографических реконструкций таких территорий в процессе проведения прогнозно-поисковых работ на алмазы.

Большое научное и прогнозно-поисковое значение имеют данные по *геохимии древних кор выветривания* (КВ), широко развитых в алмазоносных регионах на породах различного состава (терригенно-карбонатных, долеритах, туфах, туфобрекчиях, туфогенных образованиях и кимберлитах), являющихся основным поставщиком местного (в том числе и алмазоносного) материала в области накопления, формируя россыпи и россыпепроявления алмазов. На Сибирской платформе в основных алмазоносных районах (МБАР, ДААР и СМАР) благоприятные палеогеоморфологические условия для формирования мощных кор выветривания существовали в позднедевонско-раннекаменноугольное и средне-позднетриасовое время [5–7, 9, 10, 12, 14, 18, 19]. В профилях КВ на *терригенно-карбонатных породах* СП можно выделить комплекс петрохимических элементов (рис. 1, А–В), отличающихся определённой инертностью и лишь незначительно изменяющихся вверх по разрезу – P, Cr, Mn, Ti, Fe, Na и F. Наиболее значительная изменчивость характерна для серного ангидрида, Ca, Mg, Fe<sup>2+</sup>, Al и Si. Образование в верхних частях профилей

выветривания указанных пород промежуточных сульфатных минералов приводит с существенным колебаниям в этих частях элювиальных толщ концентрации Si и Al. В отличие от этого, Cr, Mn, F, P и Na характеризуются сравнительно слабой подвижностью. Положительной корреляцией в таких профилях связаны Mg–Mn, Ni–F и K–Si. В то же время Al тяготеет к паре Ni–F, а Cr – к паре Mg–Mn. Анализ распределения акцессорных элементов в пределах изученных профилей КВ этого типа в целом свидетельствует об их относительно монотонном изменении. Некоторой тенденцией к накоплению характеризуются лишь Mo, Pb, Ga, Ti и Ba. При структурном анализе корреляционных матриц выделены следующие парагенетические ассоциации элементов: Ba–Sr–Mo–Zr, V–Nb–Ti,

Co–Ni–Mn, Ga–Zn и Cu–В. В КВ на терригенно-карбонатных породах дораннеюрского возраста в верхних горизонтах отмечены повышенные концентрации Al и Fe<sup>3+</sup>. Элементы, для которых характерны уменьшения концентрации в зависимости от степени выветрелости пород, образуют следующий петрохимический ряд: Mn, K, Mg, Fe<sup>2+</sup>, Ca, Al и Ti.

На многих участках трапповых плато сохранились остатки КВ на *долеритах*. Наибольшая изменчивость и устойчивость в КВ этого типа характерна для CO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, CaO, K<sub>2</sub>O и FeO (рис. 2, А–Г). В значительно меньшей степени изменяется концентрация Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub>. В целом наблюдается наиболее чётко выраженная тенденция к накоплению Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В отличие от этого, тенденцию

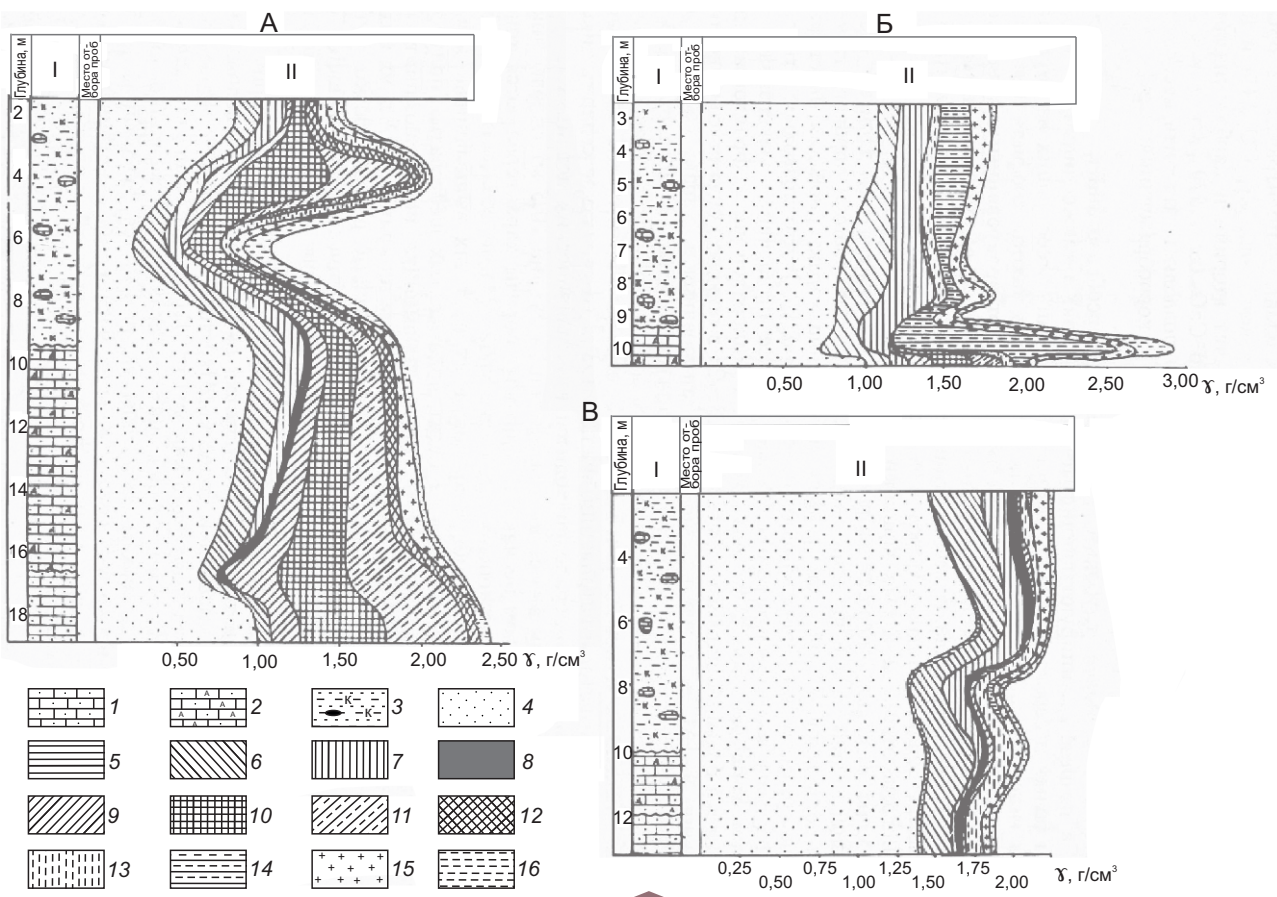


Рис. 1. Геохимические диаграммы доверхнепалеозойской (А, Б) и дораннеюрской (В) кор выветривания на терригенно-карбонатных породах [26]:

I – литологическая колонка: 1 – плотные известковистые песчаники, 2 – дезинтегрированные породы, 3 – выветрелые породы; II – концентрация компонентов (в г/см<sup>3</sup>): 4 – SiO<sub>2</sub>, 5 – TiO<sub>2</sub>, 6 – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 7 – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 8 – FeO, 9 – MgO, 10 – CaO, 11 – CO<sub>2</sub>, 12 – MnO+Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CoO, 13 – K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O, 14 – SO<sub>3</sub>+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+ппп, 15 – H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, 16 – H<sub>2</sub>O

к дифференцированному выносу из породы показывают  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{FeO}$  (переход к  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и  $\text{SiO}_2$ . Остальные породообразующие окислы не образуют чёткого линейного тренда. Акцессорные элементы в рассматриваемом типе профилей отличаются отсутствием чёткой тенденции к законо-

мерному изменению их содержания. Несколько увеличивается снизу вверх по разрезу концентрация  $\text{Rb}$  и  $\text{Li}$ . Статистически выделяются следующие парагенетические ассоциации, отличающиеся значительной устойчивостью по данному типу профилей выветривания:  $\text{Pb-Ba-V}$  и  $\text{Cs-Li-Cr}$ .

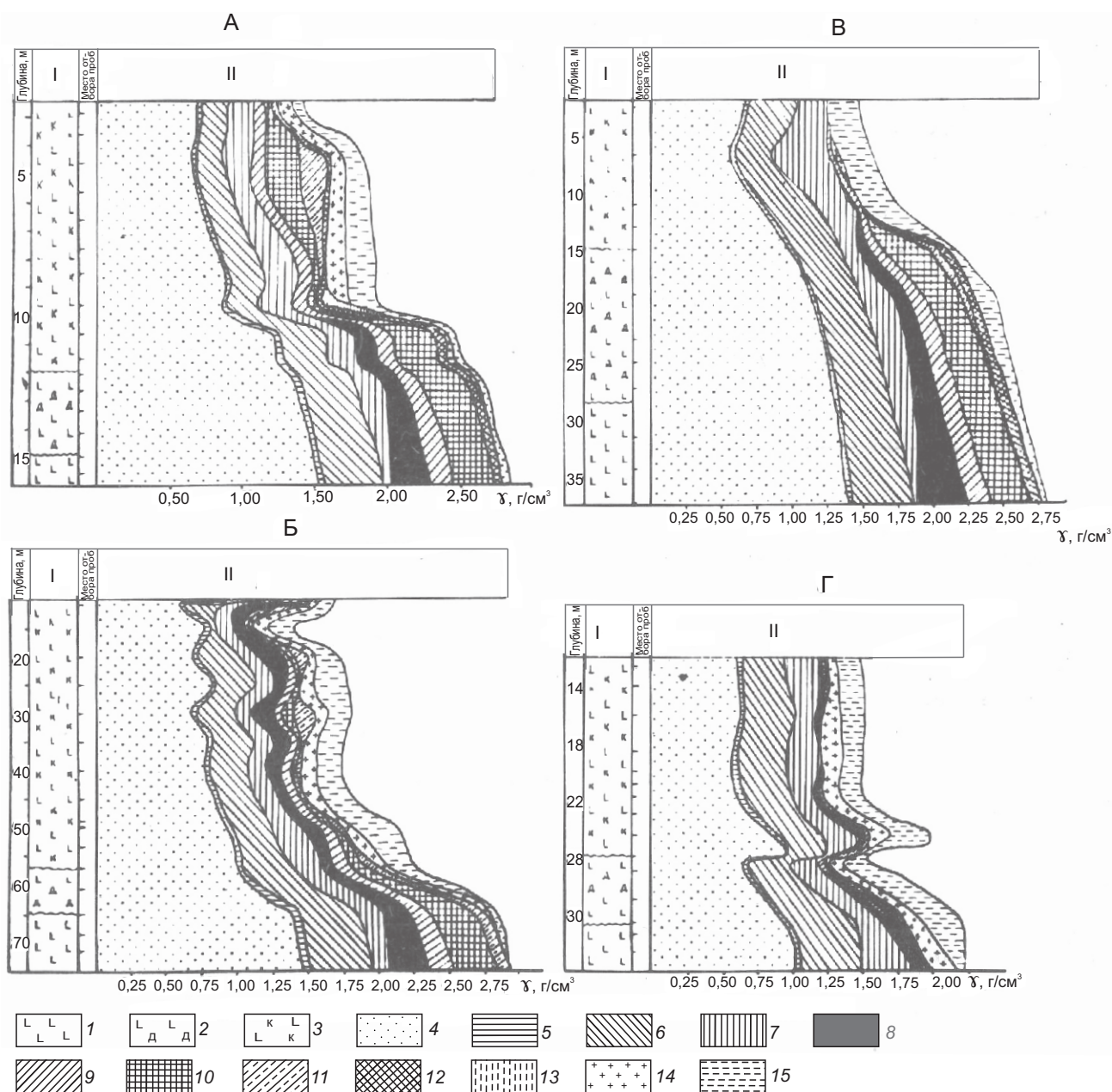


Рис. 2. Геохимические диаграммы коры выветривания долеритов по опорным разрезам [33]:

скважины: А – 264/334, Б – № 1, В – 3004, Г – 202/44; I – литологическая колонка: 1 – плотные долериты, 2 – дезинтегрированные породы, 3 – выветрелые породы; II – Концентрация компонентов (г/см<sup>3</sup>): 4 –  $\text{SiO}_2$ , 5 –  $\text{TiO}_2$ , 6 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 7 –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 8 –  $\text{FeO}$ , 9 –  $\text{MgO}$ , 10 –  $\text{CaO}$ , 11 –  $\text{CO}_2$ , 12 –  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ , 13 –  $\text{SO}_3+\text{P}_2\text{O}_5+\text{ппп}$ , 14 –  $\text{H}_2\text{O}^+$ , 15 –  $\text{H}_2\text{O}^-$

Кроме того, Сг в ряде случаев показывает довольно тесную связь с Rb. В профилях КВ *туфов и туфобрекчий трубчатого типа* преобладающая роль принадлежит  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а в отдельных частях профилей также  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (рис. 3, А–Б). Распределение почти всех компонентов отличается наличием в профилях ряда отдельных максимумов их содержания. Наиболее высокий коэффициент содержания отдельных элементов характерен для К и Са, менее – для  $\text{Fe}^{2+}$ , Мо и  $\text{Fe}^{3+}$ . Отмечаются резкие колебания в накоплении по разрезу  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , что связано с концентрацией в отдельных интервалах гидроксидов Fe. В суммарном балансе вещества по профилям этого типа общую тенденцию к накоплению показывают  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . На-

блюдается уменьшение концентрации вследствие выноса из пород  $\text{K}_2\text{O}$ , СаО, MgO и  $\text{Na}_2\text{O}$ . Для малых элементов характерно в целом примерно равномерное распределение их содержания по этому типу профилей. Некоторая тенденция к накоплению отмечена только для Ni и Со. Ассоциативный анализ этой многокомпонентной системы позволил выделить следующие устойчивые ассоциации парагенетических элементов: Sr–Zn–Cu–Sc и Со–Ni. Остальные элементы не образуют значимых корреляционных связей. Рассматривая в целом элювиальные профили выветривания туфогенных образований трубчатого типа и площадных КВ корвунчанской свиты нижнего триаса, можно наметить общую тенденцию к изменчивости:

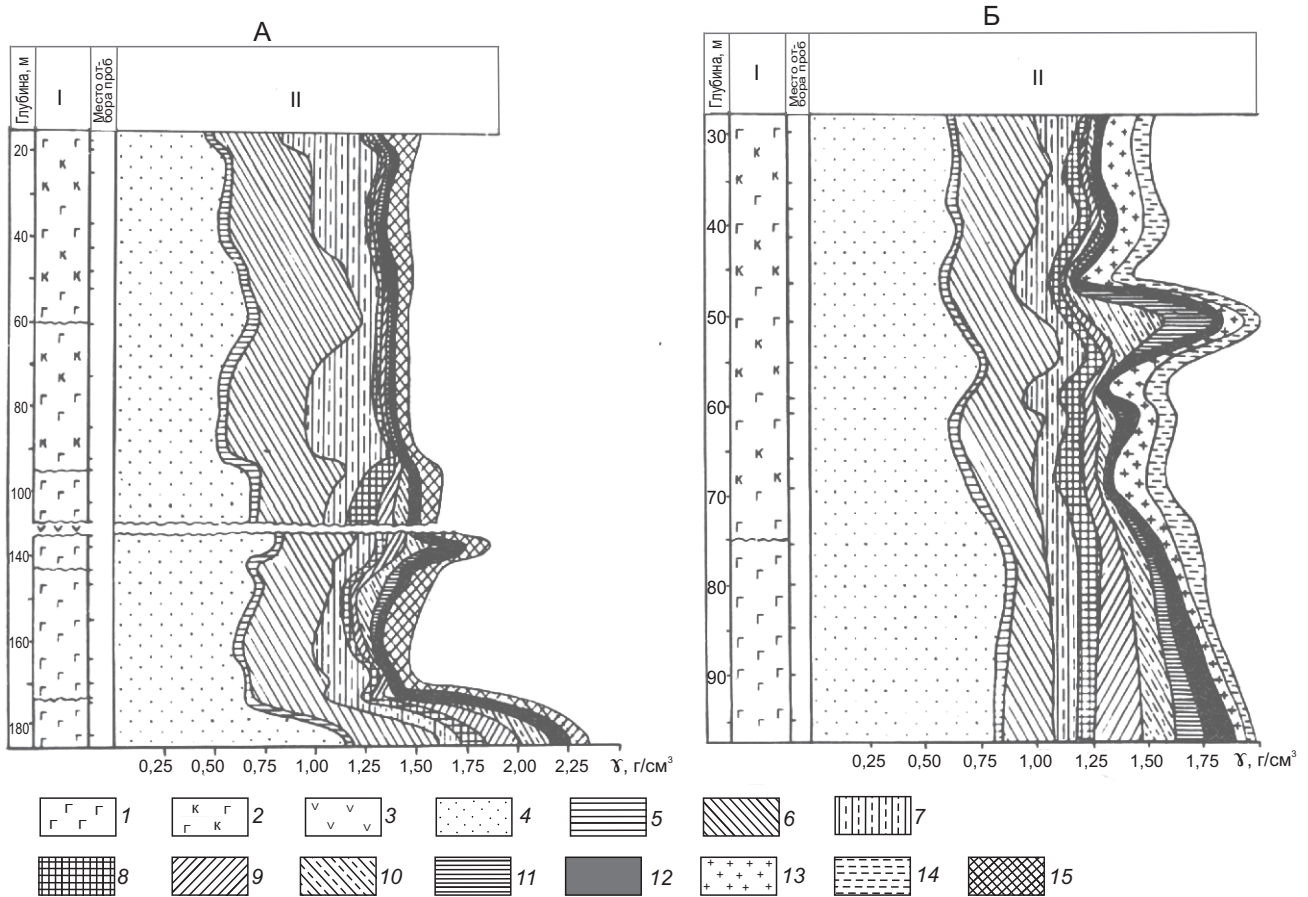


Рис. 3. Геохимические диаграммы коры выветривания туфов и туфобрекчий трубчатых тел [16] Ан-49 (А) и Ан-50 (Б):

I – литологическая колонка: 1 – туфы и туфобрекчии, 2 – кора выветривания туфов и туфобрекчий, 3 – прослои долеритов; II – оксиды (в  $\text{г/см}^3$ ): 4 –  $\text{SiO}_2$ , 5 –  $\text{TiO}_2$ , 6 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 7 –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 8 – FeO, 9 – MgO, 10 – СаО, 11 –  $\text{CO}_2$ , 12 –  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ , 13 –  $\text{H}_2\text{O}^+$ , 14 –  $\text{H}_2\text{O}$ , 15 –  $\text{H}_2\text{O}_{\text{общ}}$ .

$Mn > P > Ca > K > CO_2 > Na > F$ . Отличительной чертой профилей КВ корвунчанской свиты является высокая активность серного ангидрита, что может быть связано как с исходным составом пород, так и с поступлением растворов, обогащённых сульфосолями из нижележащих нижнепалеозойских отложений. Для пород корвунчанской свиты, подвергшихся выветриванию, характерны [9–11, 22] следующие ассоциации петрогенных компонентов:  $MgO-K_2O-P_2O_5-F$ ,  $Na_2O-TiO_2-NiO-Cr_2O_3$  и  $MgO-H_2O$ . Последняя ассоциация, также как и ассоциации  $SiO_2-Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3-CO_2$  и  $CaO-CO_2-Al_2O_3$ , не является устойчивой и обнаружена лишь в отдельных интервалах профилей выветривания.

Линейная кора выветривания на *кимберлитах* определена [8, 14, 15, 17, 19, 20] размерами самих диатрем в их верхних частях. В диатремах с наиболее химически переработанными продуктами выветривания (трубка имени XXIII съезда КПСС и др.) наиболее высокой изменчивостью характеризуются такие петрогенные компоненты, как  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $MgO$  и  $CaO$  (рис. 4, А–Г). В суммарном балансе вещества по описываемому профилю выветривания наиболее высокой подвижностью и способностью к выносу характеризуются  $CaO$ ,  $MgO$  и  $CO_2$ , что связано с растворением в процессе выветривания отдельных компонентов ультраосновной породы (кальцита, флогопита, хлорита и частично серпентина). Это обуславливает выпадение новых фаз, не идентичных по химическому составу, и удаление из разрезов продуктов реакции. Предпочтительная тенденция к накоплению свойственна  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$ . Аксессуарные элементы в большинстве случаев показывают линейную тенденцию изменения их содержания вверх по разрезу. Общее увеличение их концентрации характерно для  $Sc$ ,  $Ga$ ,  $Mn$ ,  $Nb$ ,  $V$ ,  $Cu$ ,  $Zr$ ,  $Co$ ,  $Cr$  и  $La$ . Тенденцию к выносу показывают  $Pb$  и  $Cs$ . Максимум содержания в средних частях разреза отмечен для  $Be$ ,  $Pb$ ,  $Ni$ ,  $Zn$  и  $Sr$ . Ассоциативный анализ пород данного профиля позволяет выделить следующие парагенетические ассоциации:  $Be-Sc-Mg-Cu-V$ ,  $Cr-Co-Zr-Nb-Mn$  и  $Zn-Ni$ . Остальные элементы характеризуются относительной независимостью изменения кимберлитов в процессе их гипергенного изменения. Для КВ кимберлитов ВЕП характерна (рис. 5) высокая концентрация  $SiO_2$  (до 69,5 мас.%), что вызвано повышенным содержанием в породах тонкодисперсного кварца.

В отдельных интервалах КВ, где роль тонкодисперсного кварца незначительна, концентрация кремнезёма уменьшается до 14,95 мас.%. Для изученных пород характерно невысокое в целом содержание  $Al_2O_3$  (3,10–8,90 мас.%). Сравнительно высокая концентрация в породах таких профилей  $MgO$  (4,06–18,81 мас.%) объясняется широким развитием в основной массе пород сапонита и серпентина, в структуры которых входит этот петрогенный компонент. Довольно равномерно распределён по разрезу оксид железа. Отмеченный в верхах разреза процесс наложенной вторичной карбонатизации подтверждается повышением в указанных частях содержаний  $CaO$  (от 0,051 до 0,732–29,88 мас.%) и  $CO_2$  (от 0,088 до 0,732–31 мас.%). Концентрация остальных компонентов меняется по профилю выветривания кимберлитов ВЕП незначительно.

Для общей геохимической характеристики перспективных территорий большое значение имеют [6, 7, 9, 10, 18] *палеогеохимические факторы* эволюционного преобразования геологической среды, которые взаимосвязаны с определёнными историческими эпохами и имеют свои индивидуальные особенности, характеризующие конкретные геологические периоды и унаследованные более молодыми образованиями, вплоть до сохранения этих отличий в геохимическом облике региона. В этом заключаются суть геохимической значимости геологической среды и их проблема, которая подразумевает необходимость палеогеографических построений и выяснения закономерностей формирования геохимического облика различных по возрасту отложений. Главная трудность процесса реконструкции и восстановления исторических моментов заключается в сложности развития регионов с проявлением эпох интенсивной вулканической деятельности, повышенной тектонической активности с излиянием и становлением огромных масс магматических пород, особенностей их взаимоотношений с осадочными образованиями в различные периоды, с процессами образования рудных месторождений полезных ископаемых, периодов древнего корообразования в условиях длительных континентальных перерывов. С точки зрения прикладной геохимии и экологии исследователями уделяется внимание фанерозойскому периоду, моменту возникновения органической жизни на Земле и её последующей эволюции. С появлением органической составляющей происходит формирование

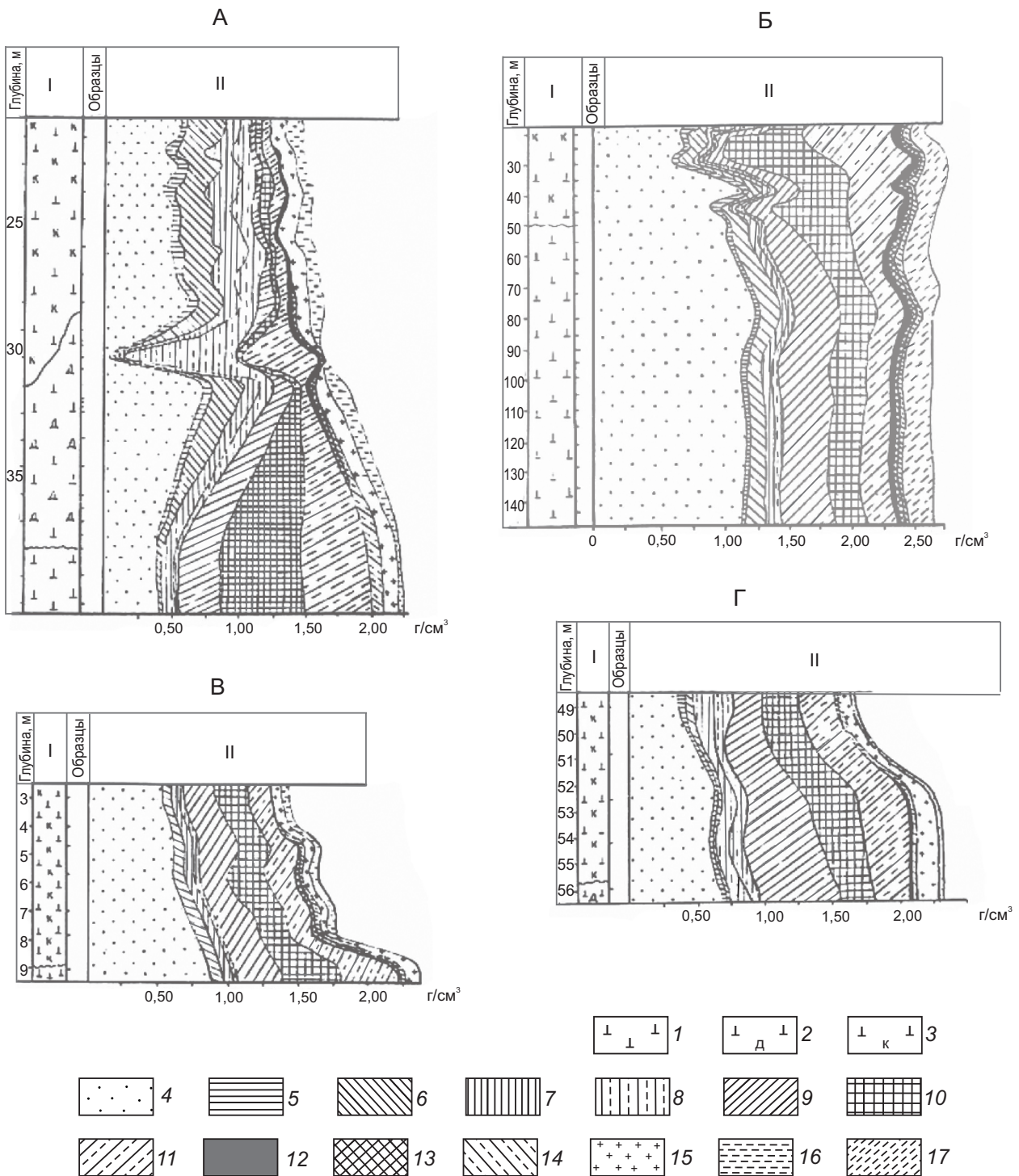
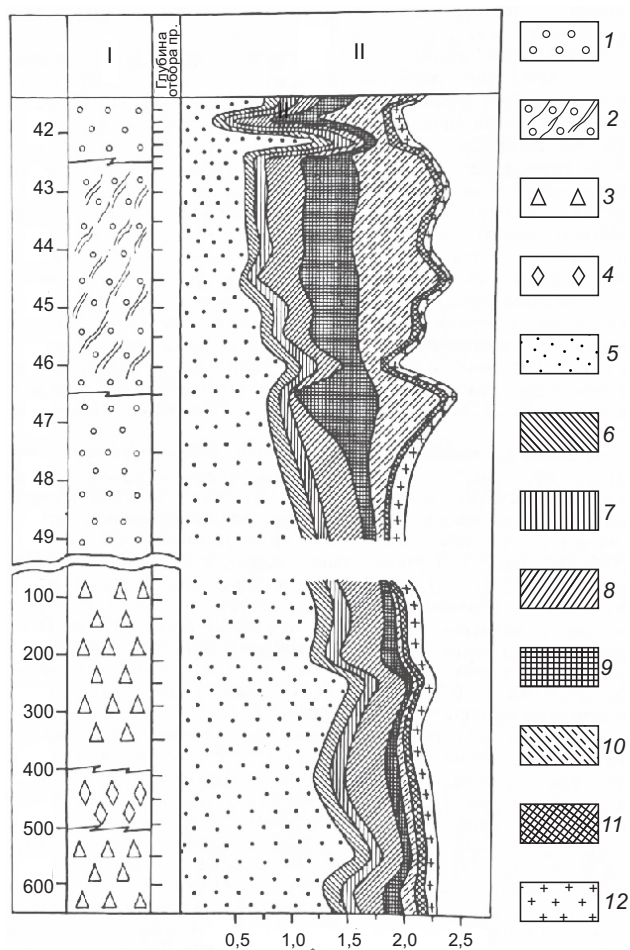


Рис. 4. Геохимические диаграммы коры выветривания кимберлитов трубок имени XXIII съезда КПСС (А), Дачная (Б), Таёжная (В) и Юбилейная (Г) [38]:

литологическая колонка: 1 – плотные кимберлиты, 2 – дезинтегрированные породы, 3 – выветрелые кимберлиты; II – оксиды (в г/см³): 4 – SiO<sub>2</sub>, 5 – TiO<sub>2</sub>, 6 – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 7 – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 8 – FeO, 9 – MgO, 10 – CaO, 11 – CO<sub>2</sub>, 12 – MnO+Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+NiO+CoO, 13 – Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O, 14 – SO<sub>3</sub>+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+F+ппп, 15 – H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, 16 – H<sub>2</sub>O, 17 – H<sub>2</sub>O<sub>общ.</sub>



**Рис. 5. Геохимическая диаграмма коры выветривания кимберлитов на одной из трубок ВЕП, вскрытых скв. 300 [38]:**

I – литологическая колонка: 1 – выветрелая автомагматическая брекчия, 2 – выветрелая, участками карбонатизированная автомагматическая брекчия, 3 – ксенотуфобрекчия, 4 – туфобрекчия; II – оксиды (в г/см<sup>3</sup>): 5 – SiO<sub>2</sub>, 6 – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 7 – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 8 – MgO, 9 – CaO, 10 – CO<sub>2</sub>, 11 – K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O, 12 – H<sub>2</sub>O<sub>общ.</sub>

исключительно мощного энергетического механизма – биогеохимического круговорота вещества в природе, представляющего собой обмен макро- и микроэлементов и простых неорганических веществ (CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O) с веществом атмосферы, гидросферы и литосферы. Круговорот отдельных веществ многими исследователями называется биогеохимическим циклом, в процессе которого химические элементы, поглощённые организмом, впоследствии покидают его и уходят в абиотическую сферу. Часть этих элементов (биофильных) через некоторое время и при

определённых условиях возвращается в живые организмы, указывая тем самым на функции живого вещества в биосфере. При палеогеохимическом анализе особое внимание уделяется эпохам существования континентальных перерывов, в период которых в результате многовековой эрозии и денудации исчезали мощнейшие толщи массивов горных пород и продукты их дезинтеграции и выветривания переносились на различные (нередко огромные) расстояния.

Геохимическое состояние геологической среды СП, строение которой осложнено [7, 8, 10] существованием крупнейших структур первого порядка: Анабарский массив, Алданский щит, Виллойская и Тунгусская синеклизы, Приверхоянский, Лено-Анабарский и Ангаро-Виллойский прогибы, Оленёкское, Сьюльдюкарское, Чернышевское, Мирнинское, Пеледуйское поднятия и др. Каждая крупная структурная единица обладает своими чертами геолого-тектонического развития, соответственно которым сформированы толщи магматических и осадочных пород, характеризующиеся специфическими вещественно-геохимическими особенностями. Сменяющиеся палеоклиматические и палеотектонические условия развития регионов от докембрия до настоящего времени привели к современному облику отложений, в том числе и обогащённых переотложенным алмазоносным материалом. В этой связи важно для каждой перспективной территории разрабатывать и применять эффективный рациональный комплекс методов и приёмов определения степени и характера концентрации и путей переноса такого материала в бассейны седиментации в период формирования осадочных толщ. Решение этой проблемы проводится путём создания геолого-геохимической модели перспективных территорий, отражающих динамику его геохимического развития от наиболее древних (доступных для изучения) пород до современных отложений. Необходимо последовательно определять и факторы оценки состояния геологической среды, являющейся объектом геохимических исследований. При изучении геохимии геологической среды (осадочные и магматические породы, зоны влияния глубинных разломов, подземные или глубинные минерализованные воды и др.) обращается внимание на определение параметров регионального и местного геохимического фона, оказавшего и определяющего своё влияние на характеристики современных ландшафтов

эколого-геохимических систем регионов. Привлечение к комплексным аналитическим исследованиям, проведённым [18] по логической схеме формирования ландшафтов «геологическая среда (осадочные и магматические породы)–почвы–природные воды–донные осадки–растительность» на основе анализа большого количества проб валового и фазового химического, количественного и полуколичественного спектрального, литологического, атомно-абсорбционного и атомно-эмиссионного и других анализов, позволило решать в каждом случае поставленные задачи. Аналогичным образом по керну скважин структурно-картировочного, разведочного, гидрогеологического и поискового бурения изучены осадочные и магматические образования регионов, с последовательным анализом средних содержаний химических элементов по литотипам пород возрастно-стратиграфических горизонтов относительно их кларковых значений или параметров регионального геохимического фона с окончательным выделением парагенетических ассоциаций химических элементов, обладающих взаимокорреляционными зависимостями.

Результирующим итогом такого рода исследований является усреднённая геолого-геохимическая модель перспективной территории. Основное внимание здесь уделяется элементам с надфоновыми (надкларковыми) значениями, основная часть которых представлена тяжёлыми металлами или микроэлементами, обладающими биогенными свойствами, которые при достижении предела концентраций нередко переходят в разряд экологически опасных.

Динамика геохимической унаследованности по вариациям вещественного состава осадочных толщ различной принадлежности отчётливо прослеживается [8, 15, 20] при анализе их от древних к более молодым образованиям. Существенно карбонатный тип разрезов осадочных пород кембрия, ордовика и силура подчёркивает морской характер накопления осадков, способствующий пересыщенности углекислым газом, хлором и аммиаком с протеканием интенсивных процессов морского выщелачивания и накоплению халько- и литофильных элементов. Определённая их часть представлена элементами Y-Се группы, указывающей на участие в объёме осадконакопления материала древних бассейнов седиментации и магматических пород основного–щелочного–ультраосновного состава. На макрохимическом уровне

реликтовые признаки морского вулканизма подчёркиваются ростом в отложениях концентрации окислов Al, Fe<sup>3+</sup>, Na и K. Девонский период является продолжением каледонского орогенеза, а также фиксируется ранними фазами образования герцинской складчатости. Климат в это время тропический влажный, умеренно влажный и сухой, а к концу девона уже выражена общая гумидизация климата. Каменноугольную эпоху характеризует период развития герцинского орогенеза, сопровождающегося трансгрессией и регрессией тёплых морей в условиях гумидного климата с отложением известняков и доломитов. Пермский период характеризуется эпохой континентального засушливого климата с общим похолоданием, приведшим к образованию пустынных ландшафтов. Интенсивное развитие биосферы в позднем палеозое с активным участием биогенных элементов в условиях мощных корообразовательных процессов на суше предопределили развитие процессов водной и механической миграции химических элементов с относительно заметным накоплением окислов Si, Al, Fe<sup>2+</sup>, P и щелочей с заметной активизацией роли элементов группы Fe. Варьирующие восстановительные и в меньшей степени окислительные условия объясняют накопление Cr, P, Mn, Ti, Zn и В. В мезокайнозойское время (триасовая, юрская и меловая системы) отмечены контрастно изменчивыми параметрами среды, вызванными раздвижением континентов, общим воздыманием материков и последовательным расчленением суши. Современный тип циркуляции атмосферы установился уже в триасовое время, что явилось причиной возникновения и формирования температурной зональности Земли с появлением областей от тропического до холодного климата и их постепенным выравниванием во времени.

Приведённые усреднённые характеристики геохимических особенностей геологической среды основных перспективных территорий являются базовыми при выявлении местных отличий уже внутри конкретных районов, вариации которых закономерно появляются в зависимости от влияния конкретных локальных факторов природного происхождения. Сопоставление разрезов и литолого-стратиграфическое расчленение осадочных толщ регионов выполнены на достаточно представительно каменном материале, который позволяет получить достаточно уверенную статистическую характеристику как по породобразующим,

так и по малым элементам. По результатам сопоставления стратотипичных разрезов, анализа условий и мощностей распределения по площади позднепалеозойских отложений многими исследователями в этой части СП выделены [4, 10] четыре структурно-седиментационные зоны: Сьюльдюкарско-Моркокинская, Алымджа-Олгуйдахская, Вилуйско-Айхальская и Моркокинская, характеризующиеся собственными условиями осадконакопления и исторического развития. Мезозойские образования, представленные преимущественно раннеюрскими терригенными осадками, наибольшим распространением пользуются в восточной и юго-восточной частях этого региона и установлены в пределах МБАР, на востоке МАР и по всему СМАР. Для решения задач геохимического картирования региона в силу больших глубин залегания под осадочными толщами чехла платформы вариации их вещественного состава принципиального значения не имеют. Это относится и к основанию осадочного чехла, сложенного породами венда – образованиями курсовской свиты, иктяхской серии и переходными к разрезу кембрия отложениями юряхской свиты.

*Кембрий* представлен на изучаемой территории тремя отделами, подразделёнными на 9 свит. В центральной части МБАР образования толбачанской, олёмминской и чарской свит раннего кембрия отнесены к единому галогенно-карбонатному структурно-вещественному комплексу, для которого характерны пласты каменной соли в составе толбачевской и чарской свит, примерно равное участие доломитов, доломитовых известняков, прослоев мергелей, аргиллитов, битуминозных брекчированных доломитов в олёмминской свите и доломит-ангидритовых пород в чарской свите. Установлена [5, 27] битуминозность практически всего разреза раннекембрийского комплекса. Отмечена для пород комплекса относительно повышенная роль Ca, Mg, K+Na, Cl, что находит своё отражение и в составе повышенного количества  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  в водных вытяжках. В геохимическом спектре доминируют Ti, Mn, Mo, Sr, Cu, Ba, V и Li [37]. Собственные геохимические черты присущи породам олёмминской и чарской свит раннего кембрия, в которых отмечены контрастные различия по поведению породообразующих окислов: рост содержания натрия, сульфата и хлора при резком увеличении объёма и числа растворимых компонентов. Здесь происходит выраженное накопление халькофильных элементов Ti, Cu, Sr

и Zn, что связано с наличием в подстилающих олёмминских породах водоносных коллекторов с хлоридно-кальциевыми рассолами. В связи с уменьшением объёма терригенной примеси в породах *чарской* свиты происходит «разубоживание» геохимического спектра микроэлементов с уменьшением количеств Ti, Mg, Ca, Mn, K, P, Ni, Cr, Cu и F при равном объёме Co, Pb, Mo и большем уровне концентраций Na,  $SO_3$ , Cl и Zn. Такое поведение макро- и микрокомпонентного состава пород свиты обусловлено определяющим влиянием пластов каменной соли. Контакты слоёв соли и карбонатных пород в разрезе свиты являются активными геохимическими барьерами, в пределах которых фиксируется возрастание количеств Sr, Mo, V, Ti, Mg, Nb и Pb. Отложения *ичерской* свиты раннего–среднего отделов кембрия являются своеобразным разделом между разными эпохами кембрийского осадконакопления, и на границе свиты фиксируются резкие изменения петрохимических характеристик раннепалеозойского разреза. По отношению к подстилающим породам здесь наблюдается рост содержания окислов Fe и Ca, резкое снижение количеств большого числа малых элементов (Ti, Mn, P,  $SO_3$ , Zn, Cl и Na) с одновременным падением объёма нерастворимого остатка. Связано это не только с вариациями литологического состава пород, но и с влиянием процессов выщелачивания под воздействием агрессивных рассолов подземного водоносного комплекса. По микроэлементным характеристикам породы свиты лишь на уровне содержания Mn близки к кларковым значениям, определяется относительное возрастание количеств W и Mo. В разрезе ичерской свиты выделяется [23, 37] группа микроэлементов, содержания которых здесь выше, чем в подстилающих чарских образованиях – Li, Mn, Co, Zn, Sr, Nb, Ag, Sn, Ga и Pb. Выделена и группа элементов с более низким уровнем концентраций – Si, Ti, V, Zr и Bi, а значения прочих микроэлементов близки между собой. Сравнение средних содержаний микроэлементов по литологическим типам ичерской свиты показывает, что максимальными значениями выделяются доломиты по уровню концентраций Li, Ba, P, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Sr и Zn, что находит своё объяснение как за счёт их литологических особенностей, так и коллекторских свойств [37]. По отношению к подстилающим породам в разрезе ичерской свиты отмечается уменьшение концентраций большинства

макро- и микрокомпонентов. Граница между ними выделяется по возрастанию количества Ba, Ga, Cr, Ti, Cu, Sr, Na и P.

В разрезе пород *среднего кембрия* выделены метегерская и мирнинская (верхоленская) свиты. В пределах Айхальского района *метегерская свита* сопоставляется с удачининской свитой. Геохимическое значение пород среднего кембрия определяется их принадлежностью к так называемому метегеро-ичерскому водоносному комплексу, несущему высокоминерализованные подземные воды, имеющие редкие области разгрузки в руслах крупных водотоков и оказывающие своё влияние на химический состав и донные осадки бассейнов рек Вилюй и Марха. Результаты химического состава пород свиты заметно выделяют их среди раннепалеозойских образований. Здесь установлено возрастание уровня содержаний таких петрогенных компонентов, как Ti, Fe, K, Mn, Mg, P, SO<sub>3</sub>, Ni, Cr, Co, Cu при одновременном уменьшении количеств Ca, F, Cl, Zn и равных (или близких к ним) концентрациях Na и Pb. Воздействие внешних факторов видно на примере брекчированных доломитов по вариациям содержаний окислов Ca, Mg и Na. По отношению к подстилающим образованиям ичерской свиты в более молодых породах метегерского разреза определён повышенный уровень концентрации широкого круга элементов [38]: P, Ba, Ga, Ge, Pb, Cr, Ti, Ni, Co, Cu, V, Mo, Ag, Sn, Sr, Mn и Mg. По степени сорбционного накопления на первое место в разрезе пород свиты выступают их терригенные разности – известняки и мергели, которые характеризуются возрастанием объёма химических элементов. Породы *мирнинской (верхоленской)* свиты среднего кембрия связаны с метегерскими постепенными переходами, и граница между ними проводится по кровле самого верхнего в разрезе прослоя кремнистых доломитов. Отличия химизма пород свиты выражены в относительно низких содержаниях окислов Si, Al, Ti, общего Fe и его окисной формы, Na, K, P, SO<sub>3</sub>. Тенденции снижения концентраций характерны для элементов группы Fe – Co, Cr, Cu и Zn. По отношению к подстилающим породам отмечается близость содержаний у окислов Ca, Ni и Pb. Главным геохимическим отличием свиты является более высокий уровень содержаний MgO и MnO, что находит своё отражение и в составе водорастворимого комплекса [37].

*Позднекембрийские образования (верхний отдел)* рассматриваемого региона характеризуются

[5, 6, 28] повсеместным распространением. Изучение геохимии малых элементов данного разреза имеет особо важное значение, поскольку в северной, северо-восточной, восточной и юго-восточной частях региона они обнажены на уровне современного среза, дренируются водными артериями и выступают здесь в роли одного из основных поставщиков выветрелого материала со склонов, формируя данные осадки и определяя их геохимическую специализацию. В разрезе позднего кембрия выделяется *холомолохская свита*, осадки которой погребены под позднепалеозойскими и раннемезозойскими отложениями в юго-восточной части территории, а в западном и северном направлениях перекрыты образованиями ордовика. На уровне современного среза породы холомолохской свиты обнажаются по долинам рек и их притоков. Вариации средних содержаний химических элементов в породах свиты обнаруживают высокую степень дисперсии в их распределении. Количества Ga, Pb, Ti и Cr отмечены в доломитах, а минимальные – у известковистых пород. В составе отложений свиты закономерны вариации содержаний инертных (накапливающихся) элементов (Pb, Zn, Ti, Mn, Ga), для которых определяется генетическая связь с карбонатными и терригенно-карбонатными породами позднего кембрия.

Образования *ордовика* представлены [5, 18, 19, 32] в регионе тремя отделами и подразделены на четыре свиты. В составе *нижнего отдела* выделена *балыктахская свита*, породы которой установлены под более молодыми осадками в виде широкой полосы с юго-запада до северо-востока. На уровне современного эрозионного среза породы свиты образуют широкие поля в северо-восточной части региона. Ранее балыктахские породы выделялись в объёме устькутской свиты раннего ордовика, которой на территории Айхальского района соответствуют олдондинская и сохолохская свиты, распространённые здесь на уровне современного эрозионного среза. Породы балыктахской свиты представлены массивными доломитами, оолитовыми и водорослевыми доломитами и мергелями, что выражается в заметном увеличении до 1,56 значений CaO/MgO. Характерной особенностью разреза является практически полное отсутствие прослоев песчаников. Для пород свиты в позднем кембрии характерны высокие концентрации Co, Ba и Nb. Для центральной части МБАР породы свиты раннего

ордовика отличаются [6] более высокой степенью участия терригенного компонента. Следствием этого являются различия их геохимического спектра, в котором для южной и юго-восточной частей характерными являются W, P, Ti, Co, Zn, Sn, Sr, Mn. Сходство микроэлементного состава разнофациальных зон выражено в близости содержаний таких элементов, как Be, Ba, Ga, Pb, Cr, Ni, Cu, V, Co, Mo, Bi и Nb [52]. По микроэлементным особенностям породы раннего ордовика региона характеризуются следующей ведущей ассоциацией: V–Ni–Co–Ti–Cu–Zn–P–Sr. Химический состав отложений *олдондинской свиты* по отношению к своим аналогам (породам балыктахской свиты) отличается более высоким уровнем концентрации таких окислов, как SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub>, при практически близких значениях прочих пороодообразующих компонентов. Для *сохолохской свиты* по данным химических анализов, даже по отношению к породам олдондинской свиты, определено возрастание содержания окислов Si, Al, Ti, Fe<sup>3+</sup> и Fe<sup>2+</sup>, Mn, K с одновременным снижением роли Ca, Mg, CO<sub>2</sub> при близости значений прочих компонентов. *Средний отдел ордовика* представлен в пределах Вилюй-Марха-Маркокинского междуречья отложениями *становской свиты*, погребёнными под молодыми образованиями позднего палеозоя–раннего мезозоя. На погребённой поверхности раннего палеозоя породы свиты развиты в западной части региона в виде узкой полосы северо-восточного направления и фрагментарно обнажены по боковым притокам р. Моркока в её среднем течении. Сложена свита пестроцветными мергелями, алевролитами, аргиллитами с прослоями известняков и доломитов. В качестве характерных химических элементов для свиты определена ассоциация Mn–Y–Yb, для которой выявлены значимые корреляции между элементами. В направлении на юг от среднего течения р. Моркока к р. Алымджа установлено возрастание уровня концентрации таких элементов, как Pb, Co, Ba и V. Литолого-фациальные изменения пород свиты обуславливают и отличия взаимокоррелируемых элементов с образованием значимой Ti–V–Co–Ga ассоциации химических элементов. Образования *верхнего отдела позднего ордовика* на рассматриваемой площади распространены [14, 17, 19, 30, 31, 33] в западной части описываемой территории в виде узкой полосы северо-восточного направления, объединённых в *харыялахскую свиту*. По отношению

к региональному фону для разреза свиты установлены повышенные содержания свинца и близкое к нему поведение Sr, Sc, Ba и V. Изучение особенностей структуры корреляционных связей и результаты анализа статистических параметров распределения содержаний микроэлементов позволили выделить в качестве характерной для свиты V–Cr–Ni–Ga ассоциацию, состав которой указывает на определённое воздействие траппового магматизма на геохимический облик пород позднего ордовика. Это достаточно полно подтверждается спецификой состава групп взаимокоррелируемых малых элементов Li–(P–V–Cr–Ga–Yb), P–(Sc–V–Ga–Y–Zr–Yb), Sc–(Ni–Zr–Yb), V–(Cr–Ni–Ga–Yb), а также высокой степенью дисперсии содержаний Sr, Ba, Ti, Li, Mn и V. Стратиграфически согласно на породах харыялахской свиты залегают образования *оюсутской свиты*, также характеризующиеся весьма локальным распределением на западе района. Разрез свиты сложен глинистыми известняками и мергелями с прослоями глинистых доломитов и известняков. Для пород свиты характерны высокие значения дисперсии Ba, Mn, V, Ti, Li и Sr, а также проявление положительных корреляций сразу нескольких групп элементов: Li–(V–Cr–Ni), Ti–(V–Cr–Ni), V–(Cr–Ni–Ga), Mn–Nb. Состав ассоциаций микроэлементов обнаруживает как сходство их с подстилающими породами харыялахской свиты, так и некоторые их отличия за счёт высокой степени активности лито- и сидерофильных элементов, связанных между собой значимыми корреляциями. Для свиты типичной является ассоциация микроэлементов V–Cr–Ga–Ba–Cu при высоких значениях дисперсии содержаний Sr, Li и V [37].

*Образования силурийского возраста* относительно высоко распространены на севере и северо-западе исследуемой территории СП, слагая обширные площади погребённой поверхности в его западной части [5]. В составе пород силура выделена *мейикская свита* раннего отделения, относимая к лландоверийскому ярусу. Представлена свита известняками и мергелями. В разрезе свиты содержание TiO<sub>2</sub>, MgO, FeO несколько ниже, чем в подстилающих породах. Определено, что рост содержаний K<sub>2</sub>O происходит при уменьшении количеств CaO, SiO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> и сопровождается параллельным увеличением объёма Fe, Ti и Mg. Подобное перераспределение содержаний петрогенных окислов и характер

их взаимокорреляций между собой свидетельствуют о существенном влиянии наложенных процессов на геохимический состав пород силура и связаны с масштабным воздействием траппового магматизма. Основные закономерности концентрации микрокомпонентов по литотипам сохраняются. Так, мергели являются основными концентраторами Li, B, V, Cr, Mn и Cu. В доломитах отмечается близость к мергелям количеств B и Cu при большом уровне содержаний Pb, V, Ni и Ti. Известняки занимают промежуточное положение между доломитами и мергелями. Для разрезов силура в качестве типоморфных элементов выделены B, Mn, Zn и Pb. Количества Cr, Cu, Mo и Sn близки к средним, а Li, Ti, Co, Ni и Ga фиксируются в нижефоновых содержаниях. По отношению к региональному фону породы мейикской свиты раннего силура характеризуются незначительным повышением количества Zn и Sn, коэффициенты концентрации которых составляют соответственно 9 и 3. В известняках этого района установлены высокие значения дисперсии содержаний Sr, Ti, Li и положительные концентрации между V–Ni–Cr–Ga–Sc, что указывает на соответствующее влияние на раннесилурийские образования процессов траппового магматизма. В целом геохимические параметры пород мейикской свиты отличаются близкими значениями большинства химических элементов, а также высокой степенью сопоставимости их с характеристиками подстилающих образований. Признаки унаследованности геохимического спектра пород свиты подчёркиваются и видовым составом микроэлементной ассоциации V–Cr–Ga–Cu.

Общими закономерностями геохимии малых элементов пород раннего палеозоя Виллой-Марха-Маркокинского междуречья могут считаться [34]: а) выдержанная тенденция понижения фоновых и средних значений в распределении содержаний снизу вверх по разрезу таких элементов, как Li, V, Cr, Co, Ni и Cu; б) повышение количеств микроэлементов в пределах конкретных участков и площадей региона (Ba, Sr, Pb, Li, V и Zn) обусловлено влиянием более поздних тектоно-магматических процессов и связано с внедрением интрузий траппов и в меньшей мере – с процессами кимберлитового магматизма; в) в направлении с юга и юго-востока на север и северо-запад геохимическая изменчивость пород раннего палеозоя связана с закономерными дифференциациями осадочного материала по латерали и является отра-

жением единой вещественной дифференциации и геохимической упорядоченности (зональности) осадочного процесса.

*Каменноугольные отложения* в основных алмазоносных районах Сибирской платформы (МБАР) представлены *лапчанской свитой среднего–верхнего отдела* (хотя ряд исследователей относят их к нижней перми), сложенной алевролитами с прослоями песков, дресвяно-гравийными отложениями, представляющими собой продукты переотложения позднедевонской–раннекаменноугольной КВ. Вариации минерального состава свиты определяют изменение и геохимических характеристик, хотя в целом для описываемых отложений характерно относительно равномерное распределение содержаний Ni, Co, V, Mn, Ti, Cu, Zn и Pb [35]. Нижняя часть свиты геохимически выделяется по повышенным содержаниям Ga при минимальных количествах B. Вверх по разрезу происходит рост концентраций Ni, Co, V, Mn, Cu, Pb и B, который сопровождается уменьшением количества Ti и Zn [37]. На более северных территориях (ДААР) аналогичные образования соответствующего возраста отмечены в конекской и айхальской свитах. Микроэлементные параметры возрастных и фациальных горизонтов этих свит являются следствием близости состава породообразующего материала и указывают на то, что на всём протяжении формирования лапчанских осадков существовали похожие по составу области питания.

*Пермские осадочные толщи* в исследуемых алмазоносных районах представлены породами ботубинской ( $P_{1bt}$ ), ахтарандинской ( $P_{1atr}$ ) и боруллойской ( $P_{2br}$ ) свит. *Ботубинская свита* пользуется широким распространением на всей территории центральной и западной частей региона. На востоке площади осадки свиты выклиниваются в области поднятий, протягивающихся в меридиальном направлении по простиранию Виллойско-Мархинской зоны глубинных разломов. Свита залегает с глубоким размывом и небольшим угловым несогласием на породах карбонатного цоколя. На лапчанских образованиях породы свиты имеют границы нечёткого размыва местного характера. Разрез свиты представлен чередованием песчаников и алевролитов с подчинёнными прослоями гравийно-галечного материала, аргиллитов, а иногда и углей. По отношению к породам раннего палеозоя осадки свиты в целом отличаются специализацией на Co, Cu и Nb,

достаточно сопоставимой с таковой для подстилающих карбонатных образований, но с переходом Ва в область фоновых значений. Характерен высокий уровень содержания Си. Для свиты выделены две основные ассоциации химических элементов [9, 12, 18, 37]: лито-халькофильная (V–Pb–Cu–Sn–Li–P), литофильная (Yb–Zr–Ga–Y–Sc). *Ахтарандинская свита* пользуется широким распространением на исследуемой территории и участвует в формировании современных ландшафтов в виде полос в пределах Батырской и Виллюйско-Ахтарандинской структурно-седиментационных зон. По уровню содержания химических элементов отложения свиты характеризуются проявлением Си-Со ассоциации. Роль Nb, типичного для подстилающих осадков, заметно снижается здесь при доминировании ассоциации Zr–Sn–Mo–Pb–Li–Nb. *Боруллойдская свита* отличается бóльшим распространением, чем осадки ахтарандинской свиты, и представлена разнозернистыми, слабосцементированными песчаниками с линзами и прослоями гравелитов и конгломератов. Геохимическая специализация пород боруллойдской свиты определена как Си-Со, сопоставимая с подстилающими образованиями раннепермского возраста, но отличающаяся наличием трёх ведущих микроэлементных ассоциаций [52]: сидеро-халькофильной (Co–Ni–Z–Sn–Yb–Ag), лито-халькофильной (Zn–Pb–Cu–V–Ti) и литофильной (Nb–P–Cr–Ga–Y–Sc).

Нижний отдел *триасовой системы* на описываемой территории Сибирской платформы представлен [5, 19] туфогенно-осадочными отложениями, в пределах МБАР – образованиями корвунчанской свиты, а на восточной границе, обрамляющей центральное лавовое плато Тунгусской синеклизы, – отложениями чичиканской свиты. Геохимические особенности этих образований обнаруживают весьма чёткие закономерные связи с интрузивными образованиями трапповой формации, генетически отражая своё происхождение. Отмечается, что интенсивность проявления в интрузивных долеритах и эффузивных образованиях (туфах и туфогенных образованиях) таких химических элементов, как V, Ti, Cu, Zn, Mo, Sn, Sb и Ba, является постоянной [37]. По отношению к долеритам в туфах фиксируется более низкий (в 2–3 раза) уровень содержания Ni, Cr, Co, Nb, Zr и Ag. Анализ корреляционных связей малых элементов обнаруживает образование нескольких парагенетических ассоциаций: Li–Ag–Ba, Sc–Cr–

Ni–Ga, Ti–Nb, V–Ni–Sn, Cr–Ga, Co–Ni, Cu–Ni, Cu–Nb и Sr–Mo. Статистические исследования установили высокий уровень дисперсии содержания таких элементов, как V, Cr, Sr, Sc, Mn, Ni и Zn. По отношению к подстилающим их породам позднего палеозоя туфогенные разности раннетриасового возраста отличаются более высокими содержаниями практически всех химических элементов, за исключением V и Cr, средние концентрации которых близки.

*Мезозойские отложения* (юрские) пользуются широким распространением на южной, юго-восточной и восточной частях Виллюй-Марха-Моркокинского междуречья. Породы этого возраста с резко выраженным размывом залегают на образованиях раннего и позднего палеозоя, туфогенных образованиях и покровах траппов раннего триаса. В разрезе отложений раннемезозойского комплекса различными исследователями выделены [19] иреляхская и дягтярская свиты рэт-геттанга, укугутская и оруктахская свиты раннего лейаса, породы плинсбахского и тоарского ярусов, широко развитые в восточных и юго-восточных частях описываемой территории. *Иреляхская свита* выделена на примере изучения МБАР, где эти отложения с размывом залегают на терригенно-карбонатных породах раннего палеозоя, выполняя понижения юрского рельефа. Представлена свита преимущественно осадками озёрно-болотных фаций, и специфическим её отличием является наличие в разрезе большого количества переотложенного материала древних КВ (в том числе и кимберлитовых пород) с образованием погребённых россыпей алмазов раннемезозойского возраста. Возрастным аналогом иреляхской свиты в СМАР выступает *дягтярская свита*, отличием которой является генетическая принадлежность к осадкам эрозионно-карстового происхождения, также обогащённым материалами переотложенных КВ. Отложения *укугутской свиты* широко распространены в юго-восточной и восточной частях описываемого региона, где она сложена разнозернистыми глинистыми песками, алевритами, прослоями гравийно-галечного материала и характеризуются наличием большого количества углефицированного детрита. *Оруктахская свита* ранней юры пространственно со вмещена с полями распространения укугутских образований и сложена конгломератами, гравелитами, песками с прослоями глинисто-алевритовых, углистых и слюдистых пород. Вариации

в смене химических элементов в отмеченных мезозойских отложениях связаны с особенностями состава размываемых областей и наличия в осадочных толщах глинистой составляющей. Отложения рэт-геттанга характеризуются проявлением максимумов таких элементов, как Si, Ti, Al и Na, что предопределяет возрастание содержания Ti, Ni, Cu, Pb, Zn, Nb, V, Li, Ag при более низких количествах Cr и P. Конгломераты укугутского возраста отличаются более высоким уровнем значений Co, Mn, Mo, близкими с иреляхскими содержаниями V, Sn, P и Li. При этом отмечается уменьшение количеств Ni, Ti, Cu, Pb, Zn, P и V. Изменение содержания микроэлементов наблюдается и в более поздних конгломератах ранней юры, в которых отмечено снижение вверх по разрезу концентраций V, Cu, Pb, Mo, Li и Ag с одновременным увеличением роли Cr, Ti, Ga, в меньшей мере Sn и P. Сравнение содержания химических элементов в сцементированных глинисто-карбонатной массой конгломератах, гравелитах и рыхлых песчано-гравийно-галечных породах также выявляет неравномерное распределение в них Ni, Co, V, Mn, Ti, Cu, Zn. Концентрации Cr, Pb, Ga, Mo, Sn, V и P незначительны. При уменьшении размерности в грубообломочных породах более мелкого псаммо-алевро-пелитового материала происходит нивелирование (при общем возрастании значений) количеств Ni, Cr, Co и заметное увеличение роли Ti, Zn и V [37]. Судя по своеобразным рядам подвижных химических элементов в песчаных, алевритовых и глинистых породах, существенно отличающихся по целому ряду малых элементов, на протяжении всего мезозойского времени происходило неоднократное изменение состава поступающего в бассейны седиментации материала различных типов кор выветривания. Более древние пелитовые породы рэт-геттанга, образующиеся в условиях интенсивного химического выветривания, отличаются максимумами накопления Cr, Ni, Co, V, Mn, Ti, Cu, Ge, Zn, Y, Nb и В. Это обусловлено интенсивностью указанных гипергенных процессов и разнообразием материала, поступавшего в бассейны седиментации. Глинистые образования укугутской свиты, отличаясь минимальными, по сравнению с более древними аналогами, характеризуются близкими количествами Pb, Ga, Mo, Sn и Li, но содержат больше свинца и серебра.

*Меловые отложения* наиболее детально изучены на северо-восточном фланге СП, где в преде-

лах Анабаро-Эбеляхского междуречья эти толщи сохранились в качестве реликтовых образований, выполняющих погребённые палеодепрессии карстового типа позднекембрийского рельефа. Выявлены эти отложения в виде небольших разрозненных проявлений, основная часть которых приурочена к центральной части территории вдоль левого берега среднего течения р. Эбелях. Представлены отложения глинами (нередко песчанистыми или алевритовыми), песками, а иногда галечниками и гравелитами. Установлено наличие химических неоднородностей в вертикальном разрезе меловых отложений, от подстилающих остаточных древних кор выветривания до кровли пластов. Выделяется положение геохимического барьера в основании мела, испытывающего непосредственное влияние КВ, в составе которых происходит интенсивное накопление окислов Ti, Al, K, Na, Si, окисного и закисного Fe, Mn и P, при одновременном выносе прочих оксидов. На границе КВ с алевритовой толщей накопительные свойства обнаруживают Si, Al, Fe<sup>3+</sup>, Mn, K, Na, P, а содержание остальных оксидов уменьшается. Геохимическая цикличность внутренних барьеров с проявлением привноса-выноса легко растворимых или малоподвижных элементов указывает на интенсивность развития эпигенетических процессов, активность которых и предопределяет общую петрогеохимическую неоднородность разреза. Ниже предела чувствительности полуколичественного спектрального анализа находится группа элементов типа As, Sb, Bi, Ti, Hg, Cs, Rb, Cd, не зафиксированных при геохимическом изучении пород мела [37]. Выделяется группа элементов, частота встречаемости значимых содержаний которых ниже 50%: Li, Be, Sc, La, Yb и W. Эта группа элементов выступает как заведомо аномальная, указывающая на привнос экзотического пороодообразующего материала в периоды накопления меловых отложений. Спектр участвующих аномальных элементов генетически увязывается с составом продуктов выветривания щелочно-ультраосновных пород, несущих в себе повышенные концентрации редких и редкоземельных элементов. Уровень их содержания в разрезе мела явно повышенный и обуславливает соответствующее возрастание значений параметров местного геохимического фона. Особый интерес занимает группа элементов (V, P, Cr, Co, Zn, Ga, Ge, Y, Nb, Ag и Sn), вариации содержания которых и высокая степень дисперсии являются

свидетельством изменчивости местных условий осадконакопления, отражают специфику литологической неоднородности и особенности проявления эпигенетических изменений состава в результате наложенных вторичных процессов [37]. В качестве элементов характерных для меловых отложений выделены Yb, La, Sc, Ti, Zn, Nb, Be, Y, Ag и W.

*Четвертичные отложения* пользуются широким распространением на описываемой территории и представлены двумя доминирующими генетическими комплексами: а) надпойменных террас, развитым в основном по водотокам первого и второго порядков; б) русловых и пойменных, а также озёрно-болотных образований. Четвертичные отложения во всех алмазоносных районах выступают в роли определяющей системы формирования современных ландшафтов, и их характеристика рассматривается в неразрывной связи с особенностями состава почвенно-растительного покрова. Эти образования и продукты их дезинтеграции являются основным поставщиком современного аллювиального осадкообразования, определяющего конкретные специфические отличия донных осадков. В целом четвертичные (в том числе неоген-четвертичные) отложения заметно выделяются повышенными концентрациями ряда геохимических элементов [37]: Be, Sc, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Nb, Ag, La, W и Pb. Наиболее контрастные геохимические черты присущи современным разногенетическим группам пород. По отношению к параметрам регионального фона современные осадки несут в себе заметно более высокие концентрации Li, Be, B, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, Y, Nb, Mo, Ag, La и Pb. Обобщающий ряд геохимической специализации осадков алмазоносных районов СП получен путём осреднения коэффициентов аномальности химических элементов с учётом значений их кларка концентрации для всего разреза неоген-четвертичных, четвертичных и современных отложений и имеет следующий вид: Zn–Co–Be–Ag–W–Cu–Y–Sc, Mn–La–Ni–Nb–Pb. Соответственно определяется и высокая степень участия данных элементов в формировании суммарного геохимического фона современных эко-геохимических систем алмазоносных районов.

**Заключение.** Таким образом, проведённые исследования подчёркивают, что для решения поставленных поисково-геохимических задач достаточно в массовом количестве использовать

традиционные методики определения химического состава как породообразующих, так и малых элементов. Определение редких элементов обычно позволяет получить существенную и интересную информацию о геохимических особенностях кимберлитов, магматитов и их индикаторных минералов (ИМК), а также других пород в алмазоносных регионах. Кроме изучения геохимии магматических и осадочных пород в алмазоносных регионах Сибирской и Восточно-Европейской платформ детально изучены геохимические составы минералов из 11 кимберлитовых трубок более чем на 40 элементов. Из трубки Удачная изучены 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, 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 спайдерграмма кимберлитов трубки Зарница по положому распределению лёгких РЗЭ (Eu, Gd, Dy, Ho, Y, Er, Yb, Lu). Заметно «отскакивают» 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 – аномалии 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. Так, в моноклинных пироксенах распределение имеет обычно пологий характер спектров, а спектры 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 клинопироксены и гранаты из деформированных истощённых перидотитов (обр. UD-3), при слабом обогащении U и Sr минимумы Zr более выражены для граната, левая часть мультикомпонентного спектра почти плоская. В клинопироксенах часто фиксируется небольшое обогащение литофилами и лёгкими редкими землями. В спектре клинопироксена из порфиро-кластического перидотита UD-11 наблюдаются пики повышенных значений U, Ta и Nb. Клиннопироксенам из лерцолитов на REE диаграмме свойственны спектры с одновременным уменьшением  $La/Yb_n$  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. Поведение индикатор-

ных 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. Существенные различия геохимического облика кимберлитов от аналогичных характеристик других типов магматических, вулканогенно-осадочных и осадочных пород подтверждают перспективность минералого-геохимического метода поисков алмазных месторождений на различных платформах мира.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Логвинова 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., 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.
4. *Бардухинов Л. Д., Зинчук Н. Н.* Алмазы из древних осадочных толщ и их поставщики (на примере Якутской кимберлитовой провинции) // Руды и металлы. – 2022. – № 2. – С. 65–86.
5. *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.
6. *Василенко В. Б., Кузнецова Л. Г., Зинчук Н. Н.* Петрохимическая фактография кимберлитовой провинции Восточной Сибири. – Новосибирск : Параллель, 2019. – 754 с.
7. *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. Дополнит. мат-лы по итогам региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы геологической отрасли АК «АЛРОСА» и научно-методическое обеспечение их решений», посвященной 35-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». – Мирный : МГТ, 2003. – С. 50–84.
8. *Зинчук Н. Н.* Влияние вторичных минералов на облик и состав кимберлитовых пород // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39, № 12. – С. 1704–1715.
9. *Зинчук Н. Н.* Геологические исследования при поисках алмазных месторождений // Вестник

- Воронежского университета. Геология. – 2021. – № 4. – С. 35–52.
10. *Зинчук Н. Н.* Докембрийские источники алмазов в россыпях фанерозоя // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2021. – № 3. – С. 50–61.
  11. *Зинчук Н. Н.* Коры выветривания и их роль в формировании посткимберлитовых осадочных толщ // Руды и металлы. – 2022. – № 2. – С. 100–120.
  12. *Зинчук Н. Н.* Кремнистые минералы в кимберлитах // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2022. – № 4. – С. 38–52.
  13. *Зинчук Н. Н.* О специфике глинистых минералов в осадочных формациях // Вестник Пермского университета. Геология. – 2022. – № 1. – С. 10–23.
  14. *Зинчук Н. Н.* Об основных источниках глинистых минералов в мезозойских континентальных алмазоносных отложениях Западной Якутии // Геология и геофизика. – 1982. – № 8. – С. 81–90.
  15. *Зинчук Н. Н.* Особенности минералов слюд в кимберлитах // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2018. – № 2. – С. 29–39.
  16. *Зинчук Н. Н.* Особенности петрографического изучения кимберлитовых пород // Отечественная геология. – 2022. – № 4. – С. 34–49.
  17. *Зинчук Н. Н.* Особенности состава и распределения слюдястых образований в кимберлитовых породах Якутии // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1991. – № 7. – С. 58–66.
  18. *Зинчук Н. Н.* Роль петролого-минералогических и геохимических исследований в оценке потенциальной алмазоносности кимберлитов // Отечественная геология. – 2022. – № 1. – С. 36–47.
  19. *Зинчук Н. Н.* Состав и генезис глинистых минералов в верхнепалеозойских осадочных толщах восточного борта Тунгусской синеклизы // Геология и геофизика. – 1981. – № 8. – С. 22–29.
  20. *Зинчук Н. Н.* Типоморфные свойства индикаторных минералов кимберлитов и их использование при прогнозировании месторождений алмаза на Сибирской платформе // Отечественная геология. – 2021. – № 2. – С. 41–56.
  21. *Зинчук Н. Н., Афанасьев В. П.* Генетические типы и основные закономерности формирования алмазоносных россыпей // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1998. – № 2. – С. 66–71.
  22. *Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д.* Алмазы из низкопродуктивных кимберлитов // Руды и металлы. – 2022. – № 1. – С. 77–93.
  23. *Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д.* Алмазы из полупромышленных кимберлитов // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2022. – № 2. – С. 32–45.
  24. *Зинчук Н. Н., Борис Е. И.* О концентрации продуктов переотложения кор выветривания в верхнепалеозойских осадочных толщах восточного борта Тунгусской синеклизы // Геология и геофизика. – 1981. – № 8. – С. 22–29.
  25. *Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д.* О специфике докембрийских источников алмазов в россыпях // Вестник Пермского университета. Геология. – 2022. – Т. 21, № 2. – С. 149–166.
  26. *Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д.* О специфике изучения алмаза при прогнозно-поисковых работах (на примере Сибирской платформы) // Руды и металлы. – 2021. – № 3. – С. 59–75.
  27. *Зинчук Н. Н., Зуев В. М., Коптиль В. И., Чёрный С. Д.* Стратегия ведения и результаты алмазопроисковых работ // Горный вестник. – 1997. – № 3. – С. 53–57.
  28. *Зинчук Н. Н., Мельник Ю. М., Серенко В. П.* Апокимберлитовые породы // Геология и геофизика. – 1987. – № 10. – С. 66–72.
  29. *Кедрова Т. В., Богуш И. Н., Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д., Липашова А. Н., Афанасьев В. П.* Россыпи алмазов Накынского кимберлитового поля // Геология и геофизика. 2022. – Т. 63, № 3. – С. 291–302.
  30. *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.
  31. *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.
  32. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Типоморфные особенности и палеогеографическое значение слюдястых минералов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1996. – № 1. – С. 53–61.
  33. *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.
  34. *Толстов А. В., Зинчук Н. Н.* Вклад Алмазной лаборатории ЦНИГРИ в научную кладовую Якутии // Руды и металлы. – 2022. – № 2. – С. 25–35.
  35. *Харьков А. Д., Зуенко В. В., Зинчук Н. Н., Крючков А. И., Уханов А. В., Богатых М. М.* Петрохимия кимберлитов. – М. : Недра, 1991. – 304 с.
  36. *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.
  37. *Ягнышев Б. С., Зинчук Н. Н., Тимченко В. А., Хмелевский В. А.* Основные черты геохимии осадочных мезозойских образований Мало-Ботуобинского района (Западная Якутия). – М. : ВИНТИ, 1976. – 32 с.

38. Ягнышев Б. С., Ягнышева Т. А., Зинчук М. Н., Легостаева Я. Б. Экология Западной Якутии (геохимия геосистем: состояние и проблемы). – Якутск: ЯНЦ СО РАН. – 2005. – 432 с.
39. 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.
40. 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.
41. Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Volkova N. I. et al. Diamond potential estimation based on Kimberlite major element chemistry // *Jornal of Geochemical Exploration*. – 2002. – V. 76, № 2. – P. 93–112.

## REFERENCES

1. Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N., Koptil' V. I. Polygenез алмазов в связи с проблемой коренных россыпей северо-востока Сибирской платформы [Polygenesis of diamonds in connection with the problem of bedrock placers in the northeast of the Siberian Platform], *Doklady Akademii nauk*, 1998, V. 361, No. 3, pp. 366–369. (In Russ.)
2. Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N., Loginova A. N. Особности распределения россыпных алмазов, связанных с докембрискими источниками [Features of the distribution of alluvial diamonds associated with Precambrian sources]. *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva*, 2009, V. 138, No. 2, pp. 1–13. (In Russ.)
3. Afanas'yev V. P., Pokhilenko N. P., Logvinova A. M., Zinchuk N. N., Yefimova E. S., Saf'yannikov V. I., Krasavchikov V. O., Podgornyykh M. M., Prugov V. P. Особности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазных полей в связи с проблемой "ложных" индикаторов кимберлитов [Features of the 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, pp. 1729–1741. (In Russ.)
4. Bardukhinov L. D., Zinchuk N. N. Алмазы из древних осадочных толщ и их поставщики (на примере Якутской кимберлитовой провинции) [Diamonds from ancient sedimentary strata and their suppliers (on the example of the Yakut kimberlite province)], *Rudy i metally*, 2022, No. 2, pp. 65–86. (In Russ.)
5. Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G. Геодинамический контроль размещения кимберлитовых полей центральной и северной частей Якутской кимберлитовой провинции (петрохимический аспект) [Geodynamic control of the location of kimberlite fields in the central and northern parts of the Yakut kimberlite province (petrochemical aspect)]. *Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Geologiya*, 2000, No. 3(9), pp. 37–55. (In Russ.)
6. Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Zinchuk N. N. Петрохимическая фактография кимберлитовой провинции Восточной Сибири [Petrochemical factography of the kimberlite province of Eastern Siberia], *Novosibirsk, Parallel' publ.*, 2019, 754 p. (In Russ.)
7. Yegorov K. N., Zinchuk N. N., Mishenin S. G., Serov V. P., Sekerin A. P., Galenko V. P., Denisenko Ye. P., Baryshev A. S., Men'shagin Yu. V., Koshkarev D. A. Перспективы коренной и россыпной алмазности Юго-Западной части Сибирской платформы [Prospects for bedrock and alluvial diamond content in the Southwestern part of the Siberian platform]. Additional materials based on the results of the regional scientific and practical conference "Actual problems of the geological industry of AK ALROSA and scientific and methodological support for their solutions", dedicated to the 35th anniversary of YANIGP TsNIGRI AK ALROSA, *Mirnyy, MGT publ.*, 2003, pp. 50–84. (In Russ.)
8. Zinchuk N. N. Влияние вторичных минералов на облик и состав кимберлитовых пород [Influence of secondary minerals on the appearance and composition of kimberlite rocks]. *Geologiya i geofizika*, 1998, V. 39, No. 12, pp. 1704–1715. (In Russ.)
9. Zinchuk N. N. Геологические исследования при поисках алмазных месторождений [Geological research in the search for diamond deposits]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2021, No. 4, pp. 35–52. (In Russ.)
10. Zinchuk N. N. Докембрические источники алмазов в россыпях фанерозоя [Precambrian sources of diamonds in Phanerozoic placers]. *Vestnik Voronezhskogo un-ta. Geologiya*, 2021, No. 3, pp. 50–61. (In Russ.)
11. Zinchuk N. N. Коря выветривания и их роль в формировании посткимберлитовых осадочных толщ [Weathering crusts and their role in the formation of post-kimberlite sedimentary strata], *Rudy i metally*, 2022, No. 2, pp. 100–120. (In Russ.)
12. Zinchuk N. N. Кремнистые минералы в кимберлитах [Siliceous minerals in kimberlites], *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2022, No. 4, pp. 38–52. (In Russ.)

13. *Zinchuk N. N.* O spetsifike glinistykh mineralov v osadochnykh formatsiyakh [On the specificity of clay minerals in sedimentary formations], *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2022, No. 1, pp. 10–23. (In Russ.)
14. *Zinchuk N. N.* Ob osnovnykh istochnikakh glinistykh mineralov v mezozoyskikh kontinental'nykh almazonosnykh otlozheniyakh Zapadnoy Yakutii [On the main sources of clay minerals in the Mesozoic continental diamondiferous deposits of Western Yakutia]. *Geologiya i geofizika*, 1982, No. 8, pp. 81–90. (In Russ.)
15. *Zinchuk N. N.* Osobennosti mineralov slyud v kimberlitakh [Features of micas minerals in kimberlites]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2018, No. 2, pp. 29–39. (In Russ.)
16. *Zinchuk N. N.* Osobennosti petrograficheskogo izucheniya kimberlitovykh porod [Peculiarities of petrographic study of kimberlite rocks], *Otechestvennaya geologiya*. 2022, No. 4, pp. 34–49. (In Russ.)
17. *Zinchuk N. N.* Osobennosti sostava i raspredeleniya slyudistykh obrazovaniy v kimberlitovykh porodakh Yakutii [Peculiarities of composition and distribution of micaceous formations in kimberlite rocks of Yakutia]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1991, No. 7, pp. 58–66. (In Russ.)
18. *Zinchuk N. N.* Rol' petrologo-mineralogicheskikh i geokhimicheskikh issledovaniy v otsenke potentsial'noy almazonosnosti kimberlitov [The role of petrological, mineralogical and geochemical studies in assessing the potential diamond content of kimberlites]. *Otechestvennaya geologiya*, 2022, No. 1, pp. 36–47. (In Russ.)
19. *Zinchuk N. N.* Sostav i genezis glinistykh mineralov v verkhnepaleozoyskikh osadochnykh tolshchakh vostochnogo borta Tungusskoy sineklizy [The composition and genesis of clay minerals in the Upper Paleozoic sedimentary sequences of the eastern side of the Tunguska syncline]. *Geologiya i geofizika*, 1981, No. 8, pp. 22–29. (In Russ.)
20. *Zinchuk N. N.* Tipomorfnyye svoystva indikatornykh mineralov kimberlitov i ikh ispol'zovaniye pri prognozirovanii mestorozhdeniy almaza na Sibirskoy platforme [Typomorphic properties of kimberlite indicator minerals and their use in predicting diamond deposits on the Siberian platform]. *Otechestvennaya geologiya*, 2021, No. 2, pp. 41–56. (In Russ.)
21. *Zinchuk N. N., Afanas'yev V. P.* Geneticheskiye tipy i osnovnyye zakonomernosti formirovaniya almazonosnykh rosspyey [Genetic types and main patterns of formation of diamond placers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1998, No. 2, pp. 66–71. (In Russ.)
22. *Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D.* Almazy iz nizkoproduktivnykh kimberlitov [Diamonds from low-yielding kimberlites], *Rudy i metally*, 2022, No. 1, pp. 77–93. (In Russ.)
23. *Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D.* Almazy iz polupromyshlennykh kimberlitov [Diamonds from semi-industrial kimberlites]. *Vestnik Voronezhskogo un-ta. Geologiya*, 2022, No. 2, pp. 32–45. (In Russ.)
24. *Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D.* O spetsifike dokembriyskikh istochnikov almazov v rosspyyakh [On the specifics of Precambrian sources of diamonds in placers]. *Vestnik Permskogo un-ta. Geologiya*, 2022, V. 21, No. 2, pp. 149–166. (In Russ.)
25. *Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D.* O spetsifike izucheniya almaza pri prognozno-poiskovykh rabotakh (na primere Sibirskoy platformy) [On the specifics of the study of diamond during predictive and prospecting work (on the example of the Siberian platform)]. *Rudy i metally*, 2021, No. 3, pp. 59–75. (In Russ.)
26. *Zinchuk N. N., Boris Ye. I.* O kontsentratsii produktov pereotlozheniya kor vyvetrivaniya v verkhnepaleozoyskikh osadochnykh tolshchakh vostochnogo borta Tungusskoy sineklizy [On the concentration of weathering crust redeposition products in the Upper Paleozoic sedimentary strata of the eastern side of the Tunguska syncline]. *Geologiya i geofizika*, 1981, No. 8, pp. 22–29. (In Russ.)
27. *Zinchuk N. N., Zuyev V. M., Koptil' V. I., Chornyy S. D.* Strategiya vedeniya i rezul'taty almazoposkovykh rabot [The strategy of conducting and results of diamond prospecting]. *Gornyy vestnik*, 1997, No. 3, pp. 53–57. (In Russ.)
28. *Zinchuk N. N., Mel'nik Yu. M., Serenko V. P.* Apokimberlitovyye porodyy [Apokimberlite rocks]. *Geologiya i geofizika*, 1987, No. 10, pp. 66–72. (In Russ.)
29. *Kedrova T. V., Bogush I. N., Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D., Lipashova A. N., Afanas'yev V. P.* Rossypi almazov Nakynskogo kimberlitovogo polya [Diamond placers of the Nakyn kimberlite field]. *Geologiya i geofizika*. 2022, V. 63, No. 3, pp. 291–302. (In Russ.)
30. *Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N.* Ob anomalii obshchey skhemy preobrazovaniya razbukhayushchikh glinistykh mineralov pri pogruzhении soderzhashchikh ikh otlozheniy v stratisferu [On the anomaly of the general scheme of transformation of swelling clay minerals during the immersion of sediments containing them into the stratisphere]. *Vestnik Voronezhskogo gos-universiteta. Seriya geologiya*, 2003, No. 2, pp. 57–68. (In Russ.)
31. *Kotel'nikov 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, pp. 53–63. (In Russ.)
32. *Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N.* Tipomorfnyye osobennosti i paleogeograficheskoye znachenie slyudistykh mineralov [Typomorphic features and paleogeographical significance of micaceous minerals]. *Izves-*

- tiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka, 1996, No. 1, pp. 53–61. (In Russ.)
33. Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N. Usloviya nakopleniya i postsedimentatsionnogo preobrazovaniya glinistykh mineralov v osadochnom chekhle zemnoy kory [Conditions of accumulation and post-sedimentary transformation of clay minerals in the sedimentary cover of the earth's crust]. Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya, 2001, No. 12, pp. 45–51. (In Russ.)
  34. Tolstov A. V., Zinchuk N. N. Vklad Almaznoy laboratoriyu TSNIGRI v nauchnyy kladovuyu Yakutii [The contribution of the TsNIGRI Diamond Laboratory to the scientific pantry of Yakutia], Rudy i metally, 2022, No. 2, pp. 25–35. (In Russ.)
  35. Khar'kiv A.D., Zuyenko V.V., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I., Ukhanov A.V., Bogatykh M. M. (In Russ.) Petrokhimiya kimberlitov [Petrochemistry of kimberlites]. Moscow, Nedra publ., 1991, 304 p. (In Russ.)
  36. Khitrov V. G., Zinchuk N. N., Kotel'nikov D. D. Primeneniye klaster-analiza dlya vyyasneniya zakonomernostey vyvetrivaniya porod razlichnogo sostava [Application of cluster analysis to elucidate the patterns of weathering of rocks of various compositions]. Doklady AN SSSR, 1987, V. 296, No. 5, pp. 1228–1233. (In Russ.)
  37. Yagnyshev B. S., Zinchuk N. N., Timchenko V. A., Khmelevskiy V. A. Osnovnyye cherty geokhimii osadochnykh mezozoyskikh obrazovaniy Malo-Botuobinskogo rayona (Zapadnaya Yakutiya) [The main features of the geochemistry of sedimentary Mesozoic formations of the Malo-Botuobinsky region (Western Yakutia)], Moscow, VINITI publ., 1976, 32 p. (In Russ.)
  38. Yagnyshev B. S., Yagnysheva T. A., Zinchuk M. N., Legostayeva Ya. B. Ekologiya Zapadnoy Yakutii (geokhimiya geoekosistem: sostoyaniye i problemy) [Ecology of Western Yakutia (geochemistry of geoecosystems: state and problems)]. Yakutsk, YANTS SO RAN publ., 2005, 432 p. (In Russ.)
  39. 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, pp. 1297–1301.
  40. 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, pp. 576–588.
  41. 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, pp. 93–112.

Статья поступила в редакцию 01.02.23; одобрена после рецензирования 15.02.23; принята к публикации 17.02.23.  
The article was submitted 01.02.23; approved after reviewing 15.02.23; accepted for publication 17.02.23.