

## ПРИРОДА СПЕЦИФИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ КИМБЕРЛИТОВ



**В. С. Шкодзинский**



**Владимир Степанович Шкодзинский,**  
доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН

Кимберлиты являются главным коренным источником алмаза. Надежда предсказать и найти крупные месторождения этого уникального минерала вдохновляла многих исследователей на попытки установить их происхождение. Однако решить эту проблему оказалось очень сложно. Выяснилось, что кимберлиты сильно отличаются от наиболее распространенных разновидностей магматических пород.

Тысячи старателей, которые почти полтора века назад начали копать «желтую землю» в Южной Африке, в окрестностях г. Кимберли, в надежде найти крупный алмаз и сказочно обогатиться, сначала предполагали, что данная порода имеет осадочное происхождение. На это, казалось бы, указывает присутствие в ней округлых и угловатых обломков различных пород и минералов. Однако постепенно выяснилось, что рыхлая «желтая земля» с глубиной

переходит в более плотную «синюю землю», тела которой секут вмещающие породы и, следовательно, имеют магматическое происхождение. Она получила название «кимберлит». Желтоватый оттенок эта порода приобретает вблизи земной поверхности под влиянием воздействия воды, кислорода и колебаний температуры.

Если кимберлиты имеют магматическое происхождение, то они, предполагалось, наиболее часто должны встречаться в океанических областях. Здесь земная кора имеет небольшую толщину, поэтому кимберлитовым магмам было бы легче достигать земной поверхности. Однако в этих областях кимберлиты отсутствуют и располагаются только на древних платформах (наиболее устойчивых частях континентов), на которых присутствует мощная (до 40 км) жесткая кристаллическая кора, мало проницаемая для магм.

*На фото сверху – карьер кимберлитовой трубки «Мир» (Западная Якутия).  
([www.ru.wikipedia.org/wiki/кимберлитовая\\_трубка](http://www.ru.wikipedia.org/wiki/кимберлитовая_трубка))*

Эти и многие другие загадочные особенности кимберлитов привели некоторых исследователей к заключению, что проблема их происхождения в настоящее время далека от разрешения. Обычно предполагается, что кимберлитовая магма образовалась на глубине 150 – 200 км в результате отделения выплавов из расплавленных, примерно на 0,1%, наиболее богатых магнием мантийных пород – перидотитов. Лишь при такой небольшой степени плавления расплав имеет состав кимберлита. Но подобному выводу противоречат экспериментальные данные [1], из которых следует, что отделение расплава из перидотитов начинается только при плавлении их более чем на 35 – 40%. При меньшей степени плавления отделению расплава препятствует прочный каркас сросшихся кристаллов минералов. Кроме того, для плавления необходимо повышение температуры. В многочисленных же ксенолитах (обломках) мантийных пород, присутствующих в кимберлитах, массово распространены явления замещения высокотемпературных минералов низкотемпературными, что свидетельствует о сильном остывании мантии – на 400°С за последние 2 млрд лет на глубине 150 км [2]. В них не обнаружены достоверные признаки разогрева и частичного плавления.

Выход из тупика в разрешении проблемы генезиса кимберлитов и других магматических пород неожиданно появился в последние десятилетия после получения доказательств горячего образования Земли и присутствия на ней в прошлом глобального океана магмы [2, 3]. Оказалось, что при учете процессов дифференциации (фракционирования) этого океана путем осаждения кристаллизовавшихся минералов легко решается проблема генезиса всех магм и находит объяснение природа особенностей кимберлитов.

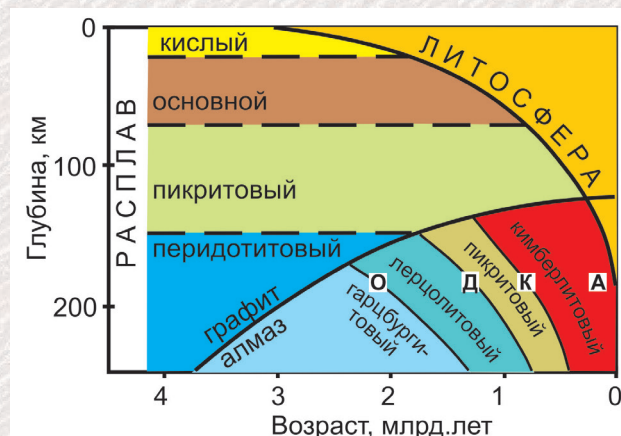
По рассчитанной модели формирования Земли [2] после быстрой аккреции (слипания) железного ядра под влиянием, в основном, магнитных сил выпадавший силикатный материал плавился в результате импактного (от ударов) тепловыделения и сформировал глобальный магматический океан. Его нижняя часть кристаллизовалась вследствие роста давления новообразованных верхних частей. Осаждавшиеся кристаллы формировали породы нижней мантии, а всплывавшие остаточные расплавы – расслоенный по составу магматический океан. После прекращения аккреции кристаллизация и дифференциация этого океана сверху вниз (рис. 1) привели к образованию большинства пород древней кристаллической коры платформ из кислого верхнего слоя и их верхней мантии – из нижнего перидотитового.

По экспериментальным данным [4] дифференциация перидотитового слоя при величине молекулярного отношения  $CO_2/(CO_2+H_2O)$  в магме более 0,6 в условиях высокого давления обусловила образование кимберлитовых остаточных расплавов. Такое происхождение этих расплавов объясняет эволюцию состава минералов в кимберлитах по законам магматического фракционирования. Известно, что существуют расплавофильные компоненты, которые имеют большое сродство к расплаву. Поэтому они интенсивно накапливались в остаточном

расплаве. Это обусловило большое содержание в кимберлитах углекислоты, воды, легких редких земель. Причина их высокого содержания до сих пор была самым загадочным вопросом в проблеме изучения происхождения кимберлитов. Мантийные породы, судя по ксенолитам в кимберлитах, почти не содержат эти компоненты. Поэтому в этих породах не могли выплавляться богатые ими расплавы. Вследствие большого давления в мантийных породах нет открытых пор и трещин, по которым можно было бы предполагать привнос расплавофильных компонентов гипотетическими глубинными жидкостями. Модель накопления в остаточном расплаве при длительном магматическом фракционировании полностью объясняет высокое содержание в кимберлитах углекислоты, воды и легких редкоземельных элементов.

Алмаз кристаллизовался в процессе фракционирования в результате увеличения концентрации углерода в остаточном расплаве при уменьшении содержания последнего. Возрастание вязкости остаточных расплавов и пересыщения их углеродом обусловило эволюцию образующихся алмазов в такой последовательности: октаэдр – ромбододекаэдр – кубы – агрегаты (см. рис. 1). Это является причиной многообразия морфологии кристаллов алмаза в кимберлитах.

Древняя кристаллическая кора платформ и кимберлитовые остаточные расплавы перидотитового слоя образовались при одном и том же процессе дифференциации различных частей магматического океана. Это объясняет присутствие кимберлитов только на платформах в участках с древней корой (правило Клиффорда). При формировании океанических областей кристаллическая кора и древняя верхняя мантия, содержащая кимберлитовые остаточные расплавы, были раздвинуты всплывавшим и растекавшимся горячим веществом нижней мантии. Всплывание обусловлено подогревом его изначально более горячим ядром. Это



**Рис. 1. Схема затвердевания магматического океана и формирования кимберлитового остаточного расплава в результате дифференциации его перидотитового слоя.**

**Условия кристаллизации различных алмазов: О – октаэдрических, Д – ромбододекаэдрических, К – кубических, А – агрегатных**

объясняет отсутствие кимберлитов в океанических областях, несмотря на массовое распространение здесь других магматических пород.

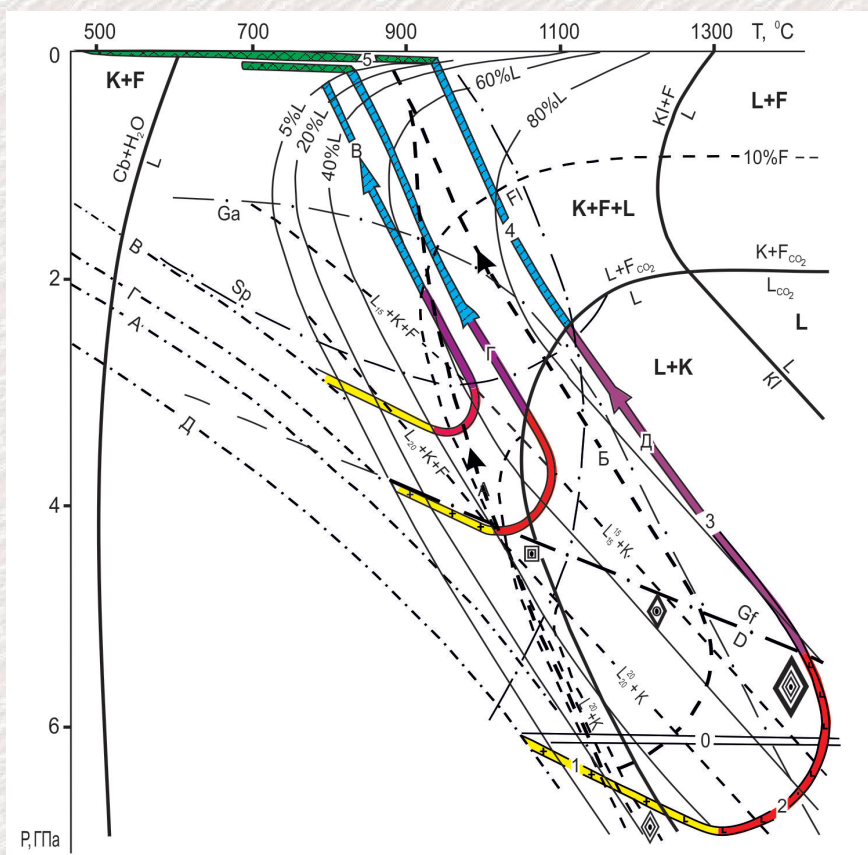
В расслоенном по составу постагрегационном магматическом океане плотность сильно возрастала с глубиной (от 2,3 до 2,8 г/см<sup>3</sup>). Поэтому при его остывании в нем не возникла обширная, от поверхности до дна, конвекция. По этой причине он остывал и фракционировал сверху вниз очень медленно в течение всей истории Земли в результате, главным образом, кондуктивных теплопотерь. Его нижний перидотитовый слой, где зарождались кимберлиты, начал кристаллизоваться сравнительно поздно. Это объясняет образование кимберлитов преимущественно в последние 500 млн лет (средний изотопный возраст 236 млн лет) и увеличение их количества в это время примерно в геометрической прогрессии [2].

В основании древних платформ среди твердых пород верхней мантии находятся участки, в которых до сих пор присутствует до 5 – 10% близкого к кимберлитам остаточного расплава. Судя по составу, он захватывался в виде включений наиболее поздними кубическими алмазами. Такие участки мантии имеют пониженную прочность и повышенную пластичность. Поэтому при тектонических деформациях платформ они выжимались в зоны растяжения подобно тому, как выжимается варенье из разламываемого пирога.

На рис. 2 приведена рассчитанная по экспериментальным и термодинамическим данным P-T диаграмма фазового состава и эволюции кимберлитовых магм с 10% H<sub>2</sub>O и 10% CO<sub>2</sub>. Она является количественной моделью этих магм и необходимой основой для решения генетических вопросов проблемы кимберлитов. Как иллюстрирует возрастание значений изоконцентрат расплава (5%L, 20%L и др.) на участках 1 – 3 линий эволюции магм, твердые фазы интенсивно плавятся под влиянием декомпрессии и фрикционного тепловыделения на глубинных стадиях выжимания смеси этих фаз с остаточным расплавом. Таким путем формировались кимберлитовые магмы. Количественные соотношения плавившихся различных минералов в разных частях под-

нимавшихся колонн сильно варьировали. Это объясняет характерную для кимберлитовых трубок большую неоднородность состава и присутствие в них богатых карбонатами участков и жил, образовавшихся, в основном, из остаточного расплава.

Формирование в низкотемпературной верхней мантии платформ обусловило относительно небольшую температуру кимберлитовых магм. Это объясняет характерное только для кимберлитов высокое содержание недоплавившихся при подъеме глубинных минералов – хромистых граната (рис. 3) и диопсида (рис. 4), оливина, пикроильменита. Частичное плавление и истирание их при подъеме является причиной часто округлой формы

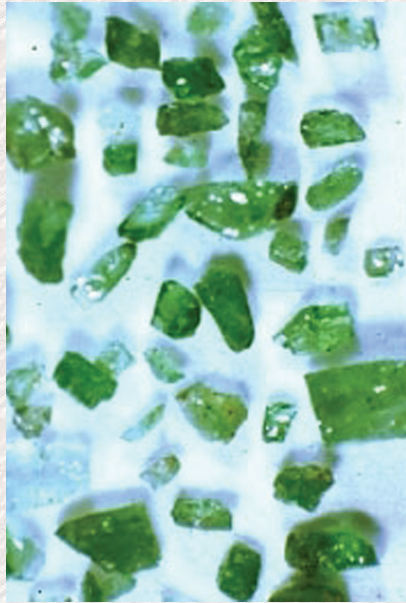


**Рис. 2. P-T диаграмма фазового состава и эволюции кимберлитовых магм с 10% H<sub>2</sub>O и 10% CO<sub>2</sub>**

Цветные жирные линии со стрелками – различные варианты эволюции кимберлитовых магм при подъеме. Цифры на линиях – этапы эволюции: 0 – домагматический этап, связанный с образованием и остыванием мантии; 1 и 2 – этапы, соответствующие интенсивному фрикционному и декомпрессионно-фрикционному плавлению; 3, 4 и 5 – этапы декомпрессионного плавления, декомпрессионного затвердевания и эксплозивной дезинтеграции кимберлитовых магм. Cb – твердые фазы карбоната в солидусных условиях; F – флюид; FI – флогопит; Ga – гранат; Gf – графит; K1 и K – твердые фазы кимберлита в ликвидусных и более низкотемпературных условиях; L – расплав; цифровые индексы – содержание воды (нижний) и углекислоты (верхний) в расплаве; Sp – шпинель. Штрих-пунктирные линии А, В, Г, Д – различные геотермические градиенты [2]. Рисунки кристаллов, показанные на диаграмме, примерно отражают морфологию зерен алмаза, наиболее часто формировавшихся на различных этапах эволюции мантии



**Рис. 3. Хромистый пироп из кимберлитов** ([http://www.about-diamonds.ru/almaz/almazonosnaya\\_trubka\\_vzryva\\_kimberlity.html](http://www.about-diamonds.ru/almaz/almazonosnaya_trubka_vzryva_kimberlity.html))



**Рис. 4. Хромистый диопсид из кимберлитов** ([http://www.about-diamonds.ru/almaz/almazonosnaya\\_trubka\\_vzryva\\_kimberlity.html](http://www.about-diamonds.ru/almaz/almazonosnaya_trubka_vzryva_kimberlity.html))

зерен этих минералов, которая делает кимберлиты похожими на осадочные породы. Кимберлитовые остаточные расплавы возникали в процессе формирования мантийных пород, поэтому пространственно были тесно с ними связаны и частично захватывали их. Это обусловило типичное для кимберлитов значительное содержание ксенолитов различных мантийных пород (рис. 5).

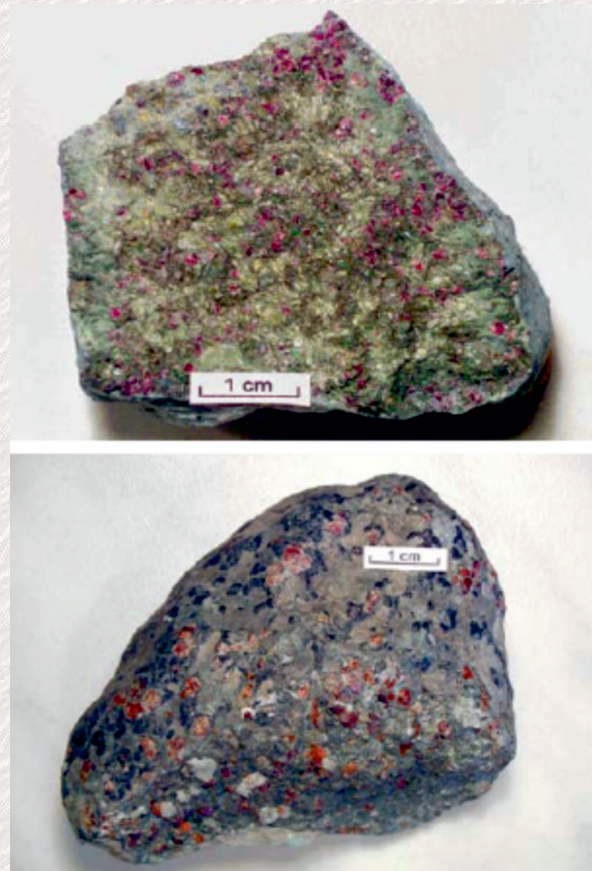
Вследствие невысокой температуры кимберлитовые магмы затвердевали на относительно малоглубинном этапе подъема (см. участки 4 на линиях эволюции магм на рис. 2). Это вызвано снижением концентрации летучих компонентов в расплаве в результате их выкипания при декомпрессии. При дальнейшем подъеме верхние части магматических колонн взрывались под влиянием законсервированного затвердеванием высокого внутреннего давления газовой фазы (участки 5).

При взрыве формировались конусообразные диатремы (рис. 6), и происходил захват раздробленным кимберлитовым материалом многочисленных обломков вмещающих пород. Это объясняет генезис ярко выраженной обломочной текстуры большинства кимберлитов, залегание их преимущественно в виде кимберлитовых трубок и отсутствие излившихся на поверхность кимберлитовых лав. Этим кимберлиты кардинально отличаются от других магматических пород. Степень декомпрессионного затвердевания в магматических колоннах перед взрывом увеличивалась снизу вверх. Это обусловило смену в кимберлитовых трубках магматических кимберлитов подводящей дайки жидкокластическими брекчиями с округлыми участками кимберлитового материала. Их обычно называют шаровыми кимберлитами. Выше находятся пластичнокластические брекчии с менее округлыми участками (автолитовые кимберлиты)

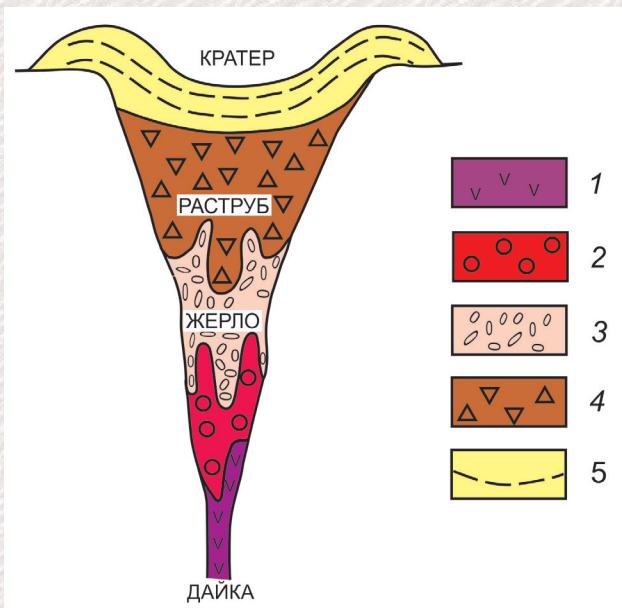
(рис. 7), далее располагаются твердокластические брекчии с угловатыми обломками (туфобрекчии и туфы) (рис. 8).

Вследствие образования литосферы (наиболее холодной и жесткой в верхней части) древних платформ в результате фракционирования постаккреционного магматического океана, все их участки перспективны на присутствие алмазоносных кимберлитов, если в них сохранились кимберлитосодержащие части верхней мантии. Это является причиной установленного в настоящее время присутствия большого количества (многих тысяч) кимберлитовых тел на различных платформах и широкого распространения алмазоносных россыпей даже на тех участках, где кимберлиты еще не выявлены.

Судя по очень высокому содержанию в кимберлитах наиболее расплавофильных химических ком-



**Рис. 5. Мантийные ксенолиты из трубки «Нюрбинской»: гранатовый перидотит (вверху) и эклогит (внизу) [5]**



**Рис. 6. Кимберлитовая трубка:**  
1 – подводящая дайка; 2 – 4 – бриллианты жидкокластическая (2), вязкокластическая (3), твердокластическая (4); 5 – вулканогенно-осадочные породы кратера [2]

понентов, остаточные расплавы приобрели кимберлитовый состав после затвердевания исходных перидотитовых магм более чем на 99,9%. Из этого следует, что близкие к кимберлитам по составу участки в мантии имеют относительно небольшой объем. Это является причиной чаще всего небольшого размера (сотни метров) кимберлитовых тел, возникавших из таких участков. Объем тел кимберлитов в тысячи – миллионы раз меньше объема наиболее распространенных магматических пород – гранитных интрузий и тел основных вулканитов.

Большая толщина перидотитового слоя магматического океана (многие десятки километров) обусловила многоярусное расположение близких к кимберлитам по

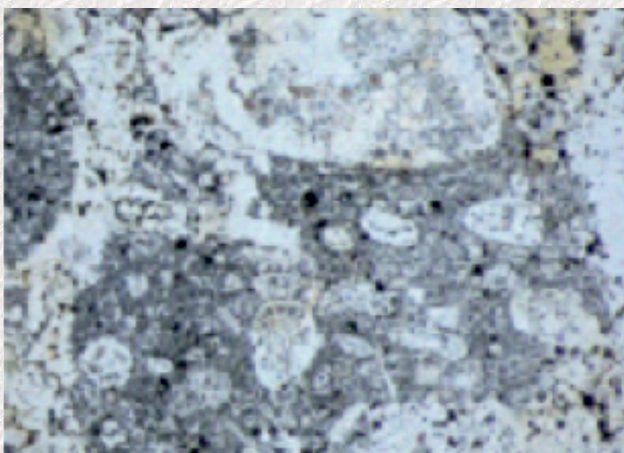
составу участков в верхней мантии платформ и их различную алмазоносность. Выжимание и всплывание разноглубинных кимберлитовых субстратов по одним и тем же зонам растяжения при тектонических деформациях является причиной совмещения кимберлитовых трубок различного состава и алмазоносности даже в одном и том же поле. Всеземная первичная латеральная протяженность перидотитового слоя магматического океана объясняет присутствие близких по составу кимберлитов на всех древних платформах.

Образование кимберлитопроводящих зон тектонических деформаций на платформах обусловлено, главным образом, механическим воздействием на них поднимавшихся из нижней мантии потоков горячего вещества (плюмов). Под влиянием декомпрессии в плюмах происходило плавление эклогитов (затвердевших богатых кальцием основных расплавов раннего магматического океана) и подъем основных магм из возникших магматических очагов. Это является причиной широкого распространения покровов и секущих тел основных пород (траппов) в пределах и в окрестностях кимберлитовых провинций.

Таким образом, новейшие данные о глобальном магматическом фракционировании при эволюции Земли позволяют разработать принципиально новую детальную модель образования кимберлитов и впервые убедительно объяснить все специфические особенности их состава и размещения. Большая плодотворность применения этих данных свидетельствует о необходимости их использования при решении других генетических проблем геологии.

#### Список литературы

1. Arndt, N. T. The separation of magmas from partially molten peridotite / N. T. Arndt // *Carnegie Inst. Wash. – Yearb.* – 1977. – V. 76. – P. 424–428.
2. Шкодзинский, В. С. Происхождение мантии, магм, кимберлитов и алмаза / В. С. Шкодзинский. – *Palmarium academic publishing*, 2012. – 579 с.



**Рис. 7. Автолитовый кимберлит [6]**



**Рис. 8. Кимберлитовый туф [7]**

3. Wood, J. A. *Lunar anorthosits and geophysical model of Moon* / J. A. Wood, J. S. Diskey, V. B. Marnin, B. H. Powel // *Proc. Apollo XI Lunar Sci. Conf. – Houston. – 1970. – V. 1. – P. 965–989.*

4. Mysen, B. O. *Melting of a hydrous mantle. 1. Phase relations of natural peridotite at high pressures and temperatures with controlled activities H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>* / B. O. Mysen, A. L. Boettcher // *J. Petrol. – 1975. – V. 16, № 3. – P. 520–548.*

5. Sablukova, L. I. *Mantle xenoliths of the Nyurbinskaya pipe (Yakutia): relicts of weakly metasomatized lithospheric mantle* / L. I. Sablukova, S. V. Sablukov, Yu. B. Stegnitsky,

V. I. Banzeruk // *9<sup>th</sup> International Kimberlite Conference Extended Abstract No. 9IKC-A-00163. – 2008.*

6. Ushkov, V. V. *Kimozero, Karelia; a diamondiferous Paleoproterozoic metamorphosed volcanoclastic kimberlite* / V. V. Ushkov, V. N. Ustinov, C. B. Smith et al. // *9<sup>th</sup> International Kimberlite Conference Extended Abstract No. 9IKC-A-00199. – 2008.*

7. Harder, M. *The Preliminary Geology of the DO-18 Kimberlite, Lac de Gras Kimberlite Province, Canada* / M. Harder, C. M. Hetman, M. C. Baumgartner, J. Pell // *9<sup>th</sup> International Kimberlite Conference Extended Abstract No. 9IKC-A-00307. – 2008.*

## НОВЫЕ КНИГИ



**Гончаров, Ю. М.** Поверхностные пространственные вентилируемые фундаменты в криолитозоне / Ю. М. Гончаров, А. П. Попович ; отв. ред. Р. В. Чжан ; Российская академия наук, Сибирское отделение, ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова. – Якутск : Изд-во ФГБУН Ин-т мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2013. – 344 с.

Рассматриваются пространственные вентилируемые фундаменты, совмещающие функции несущей конструкции и охлаждающего устройства за счет движения холодного наружного воздуха по сквозным полостям фундамента в зимнее время. Приводятся результаты многочисленных исследований моделей пространственных фундаментов на основе теории моделирования, отдельных натуральных фундаментов на полигоне, а также итоги исследований формирования температурного режима грунтов основания в процессе многолетней эксплуатации экспериментальных зданий, построенных на высокотемпературных сильнольдистых грунтах и на таликах в криолитозоне.

Разработаны основные положения по статическому расчету конструкций пространственных фундаментов. Рассматриваются вопросы подготовки промежуточного слоя и технологии монтажа элементов пространственных фундаментов. Приводятся примеры компоновки элементов пространственных фундаментов и их номенклатура.

Книга адресована инженерам-геокриологам и инженерам-строителям, научным, проектным и строительным организациям, а также будет полезна аспирантам и студентам строительных вузов.



**Гаврильев, Р. И.** Каталог теплофизических свойств горных пород Северо-Востока России / Р. И. Гаврильев ; отв. ред. М. Н. Железняк, В. И. Жижин ; Сиб. отд-ние РАН, ФГБУН Ин-т мерзлотоведения им. П. И. Мельникова. – Якутск : Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2013. – 174 с. : Библиогр. : с. 171.

В каталоге изложены систематизированные данные многолетних исследований (начиная с 70-х годов прошлого века) теплофизических свойств и физических параметров (влажности и плотности скелета) горных пород северо-восточной территории России, включающей такие крупные геологические структуры, как Сибирский кратон, Енисей-Ханганский прогиб, Байкало-Патомский складчато-надвиговый пояс, Верхояно-Колымская орогенная область, Чукотская складчатая область, Камчатская складчатая система, Охотско-Чукотский вулканогенный пояс и Олюторско-Камчатская складчатая система. Всего исследовано около 3000 образцов из 167 пунктов указанной территории. Приведенные данные рассматриваются как фактический материал, который представлен в удобной (поскважинно, с соблюдением интервала глубин отбора проб) форме для проведения геотермических расчетов по оценке теплового состояния криолитозоны.

Каталог рассчитан на мерзлотоведов, геотермиков, теплофизиков, геологов, геофизиков и др.