

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ СООБЩЕНИЯ

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ РЕСПУБЛИКИ КОМИ

*Котова О.Б.*

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

Республика Коми (РК) расположена на крайнем северо-востоке европейской части России. Ее площадь составляет 416,8 тыс. кв. км. Численность постоянного населения около 980 тысяч человек. Средняя плотность – 2,9 человека на квадратный километр. Ресурсный потенциал региона представлен возобновляемыми (лес) и невозобновляемыми ресурсами (минерально-сырьевые), которые распределены таким образом, что первые определяют в основном развитие южных и центральных районов РК, а вторые – северных. По оценочным данным, стоимость ресурсного потенциала РК составляет порядка 6 трлн. \$ США, в том числе минерально-сырьевых ресурсов – 1,5 трлн. долл. (4% ресурсной базы России). Республика Коми, будучи субъектом Российской Федерации и перспективным поставщиком различных видов природных ресурсов (включая минеральное сырье), имеет большое значение в формировании минерально-сырьевого потенциала России.

Для Республики Коми, региона с преимущественно сырьевой ориентацией, стратегия и тактика освоения сырья в условиях рыночной экономики, особо ранимой экологии северных районов, труднодоступностью и невоспроизводимостью минерально-сырьевых ресурсов имеет важное значение на всех стадиях от поисков, добычи и утилизации. Методы и подходы современной технологической минералогии должны стать определяющими при решении указанных проблем.

Территория республики покрыта сетью месторождений горючих полезных ископаемых, титана, бокситов, золота, различных видов технического сырья, стройматериалов. Недостаточно эффективные поисковые технологии и научное обеспечение затягивает открытие алмазов, коренного золота, редких металлов. Разведанность территории на нефть составляет 51%, на газ – 41%.

Республика обладает уникальным опытом разработки и реализации добычных технологий, максимально приспособленных к конкретным географическим, геологическим, экономическим и экологическим условиям. Примером может служить шахтная добыча сверхвязкой нефти на Ярегском месторождении, термодобыча нефти в Усинском районе.

Наиболее крупномасштабной проблемой является углеобогащение, снижение зольности угля. Вместе с углем перевозится огромное количество примесей, большие потери при перевозках, увеличивается количество вредных примесей в атмосфере. Много проблем при добыче и транспортировке нефти [1, 2].

Создание современных производств возможно только при наличии высококвалифицированных кадров и, следовательно, системы их подготовки. Достаточно удовлетворительно поставлен вопрос в этом отношении для нефтяного комплекса (наличие технологических, научно-исследовательских и проектных структур, включая СеверНИПИгаз, ПечорНИПИнефть, Ухтинский индустриальный институт и др.).

Большое значение имеет обобщение международного опыта, координация исследований и разработка общей политики и тактики, проведение совещаний различного уровня, выполнение международных и региональных программ. Институт геологии Коми НЦ УрО РАН за полувековой период своей работы создал научную основу практически для всех уровней технологий, способных определять не только региональную геотехнологическую политику, но и России в целом. В многочисленных научных работах нашли отражение основные критерии поисковой и технологической минералогии различных видов минерального сырья, включая самоцветного, разработаны методы перспективной оценки, предпоискового прогнозирования и поисков месторождений различных типов минерального сырья. Ежегодно институт проводит 5-6 совещаний различного уровня и научной направленности, принимает активное участие в международных и отечественных научных мероприятиях.

В отчетном докладе Президента РАН Ю.С. Осипова (Москва, ноябрь 2001 г.) был высоко оценен вклад нашего института в раскрытие и освоение минеральных ресурсов. "Чтобы продемонстрировать практические работы Академии в интересах государства в целом, приведу в этом разделе следующие примеры. На основе многолетних комплексных исследований Института геологии УрО (Сыктывкар) и производственных геологических организаций создана крупномасштабная отрасль экономики Республики Коми – горнорудная. Начата добыча тиманских бокситов с поставкой их на алюминиевые заводы Урала и Запада, достигшая уже 1 млн. тонн." Перспективы освоения минерально-сырьевых и энергетических ресурсов европейского Северо-Востока рассматриваются на совместных заседаниях Отделений наук о Земле, экономики, физико-технических проблем энергетики Президиума УрО совместно с Правительством Республики Коми.

Сегодня технологическая минералогия минерального сырья РК выходит на новый уровень. Это обусловлено, во-первых, вовлечением в переработку бедных и труднообогатимых руд, к которым на территории РК относятся некоторые коренные руды золота, а также руды титана и др. Увеличивается интерес к нетрадиционным видам ПИ (комплексные руды с низким содержанием полезного компонента, тонкодисперсное

сырье, техногенные образования и др.). Во-вторых - успехи науки в различных дисциплинах, включая аналитический потенциал.

Среди важнейших достижений российской науки было отмечено создание нового научного направления – наноминералогии. В работах Сыктывкарской школы академика Н.П. Юшкина, как одних из пионерских в минералогии, рассмотрены особенности наносостояния минерального вещества, определены размерные границы, конституционная и структурно-морфологическая специфика наноструктур и наноявлений, предложены новые модели их морфогенеза. Знание особенностей наноминералогии и поведения ультрадисперсных систем на всех стадиях работы с полезным ископаемым (поиска, добычи, переработки) дает возможность определять механизмы воздействия на наноразмерные явления и создавать новые эффективные технологии [3].

В конце 1986 года в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН была организована лаборатория технологии минерального сырья. Возглавил ее один из первых аспирантов Н.П.Юшкина кандидат геолого-минералогических наук Б.А. Осташенко. Был проведен обзор геолого-технических исследований основных видов минерального сырья европейского севера-востока, проведен анализ типов месторождений и технологических типов руд, состава и свойств минерального сырья и предложены возможные технологии на основе выявленных особенностей вещественного состава, физико-химических свойств и способов варьирования этими свойствами с целью повышения контрастности.

Под руководством Б.А. Осташенко разработана принципиальная технологическая схема улучшения качества и комплексного использования воркутинских углей, увязывающих брекетирующие с гравитационным обогащением их мелких фракций на винтовых шлюзах, разработаны технологии переработки высокопарафинистой нефти, производства серной кислоты, переработки титановых концентратов [5, 6, 7].

В области наноразмерной прикладной минералогии институт также занимает передовые позиции. Результаты нашли отражение в серии монографических работ, посвященных ультра- и микродисперсному состоянию вещества, освоению новых геотехнологий нанометрового диапазона, поскольку в современных условиях от геотехнологий требуется не только эффективное использование имеющегося минерально-сырьевого потенциала республики, но и умение оперировать нанопроцессами, знание методов модифицирования свойств и структуры наноразмерных объектов [3, 4].

В лаборатории физики и технологии минерального сырья ИГ Коми НЦ УрО РАН с 1985 года разрабатываются проблемы нанотехнологий по обогащению тонкодисперсных видов МС (нефти, угля, Ti руд, промышленных минералов, особо чистого кварца, извлечения алмазов и сверхтонкого Au, разнообразных отходов) [5, 6].

Следует отметить, что при формировании теоретических и экспериментальных основ современных геотехнологий большую роль играет не только научно-исследовательский потенциал, но и созданная в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН приборно-аналитическая база, включая сформированные пять региональных центров коллективного пользования: микро- и наноминералогических; спектроскопических; изотопных; палеонтологических исследований; моделирование кристаллообразующих процессов, а также экспериментальные и технологические комплексы института.

Достаточно сильно изменились наши привычные представления о полезном ископаемом – в технологических схемах все большую роль играет размерный фактор, возрастают требования к уровню минералогической информации по выявлению минеральных фаз, характера их взаимоотношений, что невозможно без современной аналитической базы, возможности которой отражены в современных конференциях различного уровня и публикациях [8]. В первую очередь речь идет о диагностических минералогических методах. Успехи в области анализа дифракции рентгена, автоматического анализа изображений, поверхностных методов (например, TOF-SIMS), успехи в инфракрасном изображении значительно расширили наше понимание природы минеральных разновидностей и поверхностных свойств минералов. Количественные методы прикладной минералогии становятся ключевыми для технологий минерального сырья и определяют перспективы методов извлечения и формирования полезного компонента на электронном, атомарном и молекулярном уровнях. Наглядным примером является достаточно быстро развивающаяся композиционная картография минералов (в трехмерном изображении) *in situ*. Оптические микрографы (томографы) после компьютерной обработки результатов послойного сканирования дают пространственное изображение (скелет) необходимого компонента образца. Большое внимание уделяется перспективам синхротрона в минералогических исследованиях. Наблюдается тенденция получения изображения в область электронных явлений и рентгена. Почему? Излучение синхротрона обеспечивает большие возможности исследования структуры и свойств вещества во всех фазовых состояниях и широком диапазоне размеров, хорошо комбинируется с другими методами, дополняя информацию от нейтронного рассеяния, электронной микроскопией, ядерным магнитным резонансом и т. д.

Достижения в области исследования поверхностей минеральных систем также опираются на современную приборную базу, для решения возможностей которой активно используется комбинирование методов и методик, последнее мы продемонстрировали при исследовании минеральных систем в малой нанометровой области [9].

Разработана методика исследования приповерхностных слоев алюмосиликатных комплексов методом рентгеновской рефлектометрии для оценки с высокой точностью их физических и геометрических свойств, а также тонких пленок, наносимых различными способами на алюмосиликатные подложки, измерения диаметра пор и нанотрубок в малой нанометровой области с целью получения минерального сырья с новыми свойствами.

Продолжаются исследования адсорбционных процессов, которые широко распространены в природе и являются объектом пристального интереса, поскольку сорбционные свойства минералов (как и остальные физико-

химические свойства), являясь функцией их конституции и генезиса, отражают геологические процессы и техногенные преобразования.

В результате многолетних исследований системы газ-минерал в физических полях автором накоплен и обобщен значительный экспериментальный и теоретический материал в области физики и химии поверхности минералов.

Установлена возможность активации (модификации) поверхности тонкодисперсных минеральных систем за счет избирательного взаимодействия поверхностных центров с молекулами газовой фазы в физических полях. Показано влияние адсорбофизических полей на физико-химические параметры исследуемых систем, которое обусловлено связью адсорбированной фазы и объема на электронном, атомарном и молекулярном уровнях. Выявлены новые свойства минералов при модификации поверхности в процессе нарушения адсорбционно-десорбционного равновесия: адсорбоэлектрические, адсорбомагнитные, адсорбооптические, в том числе адсорболюминесцентные. Установлен механизм и природа поверхностного нескомпенсированного заряда – базового параметра формирования энергетики наносистемы. В результате изучения поверхностных реакций взаимодействия молекул газовой фазы с тонкодисперсными минеральными системами обоснованы основные принципы и предложены адсорбофизические методы сепарации тонкодисперсного минерального сырья.

В продолжение этих исследований были синтезированы наноструктуры титановых минералов (на примере анатаза). Показано, что наноструктурная модификация минералов приводит не только к изменению кинетики поверхностных процессов, но и к возникновению новых процессов.

Получены спектры РСА наноструктурированного диоксида титана, синтезированного различными способами и изображение, полученное трансмиссионным электронным микроскопом. Исследована адсорбция  $\text{CO}_2$  на синтезированных и исходных образцах. Наблюдается увеличение кислотных и основных центров, интенсивность адсорбции  $\text{CO}_2$  на  $\text{TiO}_2$  увеличивается на порядок, кроме того наблюдается окисление  $\text{CO}$ . Полученные результаты важны для понимания роли поверхности в природных и техногенных процессах (технологических схемах) [10]. Предложена модель формирования полезного компонента на минеральных носителях и как основы нанотехнологий нетрадиционных видов минерального сырья в результате выявленных особенностей наноструктурной перестройки (образование тубулярных и ламинарных наноструктур), определяющих физико-химические свойства поверхностных минеральных образований, использование “памяти” минералов как алгоритм процессов в технологических схемах.

В нанотехнологиях нуждаются практически все виды полезных ископаемых: Au, Pt, Cu, сульфиды, глины и т.д. Наноразмерные технологии предполагают изучение и внедрение механизмов извлечения ценных компонентов на молекулярном, атомарном и электронном уровнях, когда существует возможность управлять процессами на стадии формирования полезных ископаемых.

В среднесрочные планы фундаментальных исследований по Приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации в технических дисциплинах включены разработки технологий создания нанoeлектронных структур методом селективного удаления атомов. Аналогичные направления исследования в технологической минералогии стимулируют разработки принципиально новых технологий, в которых алгоритмы обогащительных процессов будут задаваться на атомарном уровне с выходом полезного продукта с определенными параметрами структуры. Это значительно расширит возможности полезного актива минерального сырья.

В настоящее время предложены способы формирования нанoeлектронных структур. Одним из способов модификации свойств и корректировки параметров структуры является селективное удаление атомов на примере анальцима. Анальцим является узкопористым цеолитом с величиной диаметра входного окна 0,26 нм, что позволяет ему сорбировать небольшие молекулы (например, водорода). Проведенные исследования показали возможность изменения размера пор за счет процессов дефектообразования и формирования нанoeлектронных структур методом селективного удаления атомов.

При наноструктурной модификации перспективными становятся биотехнологические методы извлечения полезных компонентов. Но и в этом направлении приходится проводить ревизию существующих представлений. Так теория катализа нашла широкое приложение в развиваемых биотехнологиях, однако при этом поменялись местами адсорбат и адсорбент. Адсорбция металлов поверхностями бактерий достаточно широко известна и может влиять на видообразование и мобильность металлов в окружающей среде. Перед учеными стоит проблема разработки модели биотехнологий в системе металл-бактерия. Представляется, что при формировании модели необходимо использовать конкуренцию молекул газовой фазы и микробных организмов при взаимодействии с минеральными поверхностями при захвате катионов и анионов в различных природных системах. Наноструктурная модификация позволит сделать этот процесс управляемым.

К новым источникам минерального сырья можно отнести “невидимое” (ультра-тонкодисперсное) золото, присутствующее в коренных рудах, а также в рудах черных и легирующих металлов (железа, марганца, титана), фосфоритах, бокситах, полиминеральные руды цветных металлов, как природного, так и техногенного генезиса, в которых минеральные фазы никеля, меди, кобальта, а также благородных металлов образуют микро-нанометровые выделения, угли и гематитовые руды, с которыми связаны промышленные содержания германия, присутствующего не только в адсорбированной форме, но и образующего собственные ультрадисперсные минеральные формы и многие другие полезные ископаемые. Многочисленные новые источники минерального сырья требуют освоения. Например, органические минералы. В этом плане наноструктурная модификация имеет большое значение, например, синтез алмазов (нефтей).

Возможность трансформации метана в алканы и алкены от образования C-C, C=C связей до полимеризации на минеральных поверхностях в зависимости от P,T-условий зафиксирована и исследована рядом ученых [11, 12]. Предложен механизм конверсии углеводородов. Исследования в системе органика-минерал стимулировали синтез алмазов и алмазоидов, позволили выявить механизм из природного образования. По данным японских ученых, молекулы адамантана (известного как алмазоиды) впервые были обнаружены в природной нефти в 1933 г. [13]. Выявление углеводородных включений в спутниках алмаза свидетельствует об участии углеводородов в процессах флюидной сульфуризации расплавов, ведущих к образованию алмаза и в образовании флюидных потоков, сопровождающих дифференциацию и кристаллизацию магм [14]. В Институте геологии также велись работы по трансформации и миграции углеродного сырья, например, образование твердого битума в процессе взаимодействия настурана и нефти [15], синтезу алмазов в системе органика-минерал при нормальных условиях [16], наноструктурированию алмазных и алмазоподобных систем [17] и т.д. Наличие многочисленных работ говорит об огромном интересе как к экспериментальным исследованиям по изучению переноса и конверсии органического вещества в различных средах в зависимости от P,T-условий, так и теоретических основ этого явления. Экспериментально установлена возможность трансформации углеводородного сырья в условиях плазмы. Действие плазмы заключается в эффективном отделении атомных структур углеводородного сырья с последующим быстрым рекомбинированием в наночастицы. Например, при воздействии лазерного излучения на нефтяное сырье Яреги наблюдалось изменение электронной плотности поверхности алмазной подложки. Проводимые работы этой составляющей общей проблемы трансформации углеводородного сырья могут стать основой для решения проблемы извлечения алмазов, покрытых нефтяной пленкой, которую можно не удалять (как это пытаются сделать), а наращивать грани кристаллов алмаза [18].

В заключении, хотелось бы отметить, что технологическая минералогия минерального сырья Республики Коми, как и прежде, формирует мост между фундаментальной наукой о веществе и индустрией, обеспечивающей поступательное движение республики. Основные задачи технологической наноминералогии были обозначены в пленарном докладе на Международной конференции “Плаксинские чтения” во Владивостоке: выявление нанообразований; изучение механизмов наноявлений; определение физико-химических свойств наноявлений и нанообразований; разработка методов направленного изменения наноструктур и их свойств [19].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Север: наука и перспективы инновационного развития // Отв. ред. В.Н. Лаженцев. Сыктывкар, 2006. 400 с. (Научный совет РАН по вопросам регионального развития; Коми научный центр УрО РАН).
2. Горнопромышленный комплекс Республики Коми // Горный журнал. № 3. 2007.
3. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. СПб.: Наука, 2005. 581 с.
4. Микро- и нанодисперсные структуры минерального вещества. Сыктывкар: Геопринт, 1999. 120 с.
5. Минерально-сырьевой потенциал Тимано-Североуральского региона и роль Российской академии наук в его укреплении и освоении // Н.П. Юшкин, И.Н.Бурцев, А.М.Пыстин, Н.А.Малышев, Б.А.Остащенко. Сыктывкар, 2001. 72 с. (Научные доклады / Коми научный центр УрО РАН; Вып. 440).
6. Остащенко Б.А., Коржаков В.В., Усков Н.Н., Котова О.Б. Технологические исследования в Республике Коми (современное состояние, перспектива) // Материалы XII геологической конференции. Сыктывкар, 1994. С. 25-27.
7. Гравитационное обогащение энергетических углей (аналитический обзор, эксперимент. исследования) // Бурцев И.Н., Шумилов И.Х. Сыктывкар, 1997. (Научные рекомендации народному хозяйству)
8. Geochemical et cosmochemical acta. Elsevier, 2008; Proceedings of Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Brisbane. 2008.
9. Вахрушев А.В., Котова О.Б., Понарядов А.В. Рентгенодифракционный метод при исследовании наноразмерных систем // Северные территории России: проблемы и перспективы развития: Матер. Всероссийской конференции с международным участием. Архангельск, 2008. С. 222-223.
10. Valyon J., Kotova O., Ponaryadov A. Formation Mechanism and Properties of Nanosize Phases on Mineral Surface. Journal of Materials and Corrosion. 2008. P. 75-77.
11. Котова О.Б., Кузьмин Г.Н., Басов Л.Л. Фотохимические превращения метана на некоторых оксидах // Материалы II Всесоюзной конференции по возобновляемым источникам энергии. Ереван, 1985. С. 85.
12. Takita Y. et al. Surface reaction of oxidation of alkenes by O<sup>-</sup> in MgO // J. Phys. chem., 1980. Vol. 84, № 13. P. 42.
13. Echigo T. et al. Crystalline adamantane (C<sub>16</sub>H<sub>10</sub>) co-existed with native mercury from Itomuka mine, Hokkaido, Japan // Frontiers in Mineral Sciences 2007. Cambridge. UK. 2007. P. 55.
14. Гаранин В.К. Минералогия кимберлитов и родственных им пород алмазаносных провинций России в связи с их генезисом и поисками. Автореферат доктор. Диссертации. Москва, 2006. 44 С.
15. Дымков Ю.М., Кунц А.Ф., Дойникова О.А. Образование твердого битума в процессе взаимодействия настурана и нефти при 300 °С // ДАН. 2003.
16. Остащенко Б.А., Каликов В.Н. Способ синтеза алмаза. АС. № 209080.
17. Петровский В.А. и др. Наноструктурирование алмазных и алмазоподобных систем. Сыктывкар: Геопринт, 2007, 36 с. (Отчетная серия № 2(51)).

18. Котова О. Б., Петраков А. П., Тропников Е. М. Органические минералы как новый тип минерального сырья: экспериментальное моделирование // *Материалы Международного минералогического семинара*. Сыктывкар: Геопринт, 2008. С. 172 – 173.

19. Ожогина Е.Г., Котова О.Б., Чантурия Е.Л. Роль технологической минералогии в прогнозной оценке качества минерального сырья и его глубокой и комплексной переработке // *Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья*. М. Издательский дом "Руды и металлы", 2008. С. 35-51.

20. Петраков А.П. Рентгеновские рефлектометрические исследования нефтяных дисперсных систем // *Поверхность*. 2003. № 12. С. 75-77.

## УГЛЕВОДОРОДНОЕ СЫРЬЕ: НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**Тропников Е.М., Котова О.Б.**

Институт геологии КомиНЦ УрО РАН, Сыктывкар

При столь интенсивном использовании георесурсов планеты современным обществом возникает необходимость в освоении новых источников минерального сырья. Получение искусственных многофункциональных материалов на минеральной основе стало экономически перспективной индустрией. Технологическая наноминералогия сегодня формирует мост между фундаментальной наукой о нановеществе и индустрией, обеспечивающей потребности человека. Основные задачи: выявление механизмов нанообразований, изучение физико-химических свойств и возможностей их изменения на всех стадиях изучения и освоения минерально-сырьевых объектов. Требуют освоения новые источники минерального сырья, например, органические минералы. В этом плане наноструктурная модификация имеет неограниченный потенциал.

Органические молекулы могут контролировать форму, размер, текстуру и даже кристаллическую структуру во время кристаллизации. Эксперименты по контролируемому росту минералов в содержащих органику средах (на примере углеводородов) в лабораторных условиях помогут понять природные процессы (минерализации, биоминерализации и т.д.). Процессы миграции углерода и трансформации углеродных фаз играют важную роль в различных геологических процессах от синтеза добиотических органических молекул до современных реакций выветривания, знание механизмов этих процессов необходимы при разработке имплантов и т.д.

Возможность трансформации метана в алканы и алкены от образования C-C, C=C связей до полимеризации на минеральных поверхностях в зависимости от P,T-условий зафиксирована и исследована рядом ученых [3, 7]. Предложен механизм конверсии углеводородов. Исследования в системе органика-минерал стимулировали синтез алмазов и алмазоидов, позволили выявить механизм их природного образования. По данным японских ученых, молекулы адамантана (известного как алмазоид) впервые были обнаружены в природной нефти в 1933 г. [8]. Выявление углеводородных включений в спутниках алмаза свидетельствует об участии углеводородов в процессах флюидной сульфурзации расплавов, ведущих к образованию алмаза и в образовании флюидных потоков, сопровождающих дифференциацию и кристаллизацию магм [1]. В Институте геологии УрО РАН также велись работы по трансформации и миграции углеродного сырья, например, образование твердого битума в процессе взаимодействия настурана и нефти [2], синтезу алмазов в системе органика-минерал при нормальных условиях [4], наноструктурированию алмазных и алмазоподобных систем [6] и т.д. Наличие многочисленных работ говорит об огромном интересе как к экспериментальным исследованиям по изучению переноса и конверсии органического вещества в различных средах в зависимости от P,T-условий, так и теоретических основ этого явления.

Известен способ синтеза микропорошков алмазов [Патент РФ № 2042614, МПК C01B31/06, 1995.08.27], включающий воздействие на неалмазные модификации углерода высоких давлений и температур, соответствующих области стабильности алмаза. Воздействие осуществляют обработкой поверхности образцов сфокусированным излучением импульсного лазера, работающего в режиме модулированной добротности с длительностью лазерного импульса  $10^{-7} - 10^{-12}$  с и плотностью мощности излучения  $10^7 - 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>. Недостатком данного метода является возникновение большого градиента температуры (из-за использования импульсов с данной длительностью импульса), вызывающем механические напряжения, следствием которых является образование дефектов, обычно, дислокаций.

В рамках проводимых нами исследований по изучению конвергенции углеводородного сырья проведены эксперименты по моделированию контролируемого роста алмаза из нефтяного сырья Яреги при воздействии импульсным лазерным излучением (длительность импульса 0,5 мс).

В отличие от вышеуказанного способа синтеза алмазов, применение миллисекундных лазерных импульсов сопровождается градиентом температуры  $\sim 10^5$  град/с, что на несколько порядков меньше, чем у импульсов с длительностью  $10^{-7} - 10^{-12}$  с. Таким образом, уменьшение градиента температуры сопровождается образованием более совершенной структуры кристаллов.