

НАНОРАЗМЕРНЫЕ И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ

УДК 541.15+541.128–022.532

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ ГЕРМАНИЯ,
ПОЛУЧЕННЫХ В АЦЕТОНЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. А. А. Ревина^{а, *}, В. В. Савельев^а, Т. В. Кривенко^а, В. А. Кабанова^а,
В. В. Высоцкий^а, С. И. Позин^а

^аИнститут физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
Ленинский пр., 31/4, Москва, 119071 Россия

*e-mail: Alex_revina@mail.ru

Поступила в редакцию 17.11.2022 г.

После доработки 24.11.2022 г.

Принята к публикации 01.12.2022 г.

Стабильные наноразмерные частицы германия синтезированы в жидкой среде (ацетон) при лазерном облучении пластинок из монокристаллического германия в аэробных и анаэробных условиях при комнатной температуре. Различные экспериментальные методы: оптическая спектрофотометрия, атомная силовая микроскопия (АСМ), динамическое рассеяние света (ДРС), позволили детектировать стабильные наноразмерные частицы Ge в ацетоне, зарегистрировать спектры оптического поглощения и люминесценции в зависимости от времени лазерного облучения в присутствии и отсутствии кислорода. Особое внимание уделено результатам воздействия лазерного облучения на физико-химические свойства чистого ацетона.

DOI: 10.31857/S004418562370078X, EDN: GIAHUD

ВВЕДЕНИЕ

Повышенный научный и практический интерес к наноразмерным частицам германия (НЧGe) можно объяснить их уникальными свойствами и функциональной активностью, что важно для их использования во многих технологиях в качестве эмиттеров света, для катализа, в солнечной энергетике, биохимии и биомедицине [1–8]. Применение в медицине связано с тем, что благодаря своей нетоксичности и антиоксидантным свойствам, особенно после работ Асаи 1980 г. [3] и трудов советских ученых [6] по синтезу водорастворимых комплексов с карбоновыми кислотами германий, во всем мире признан эссенциальным металлом для жизнедеятельности живых организмов. Принимая важность процессов самоорганизации НЧ металлов [9–12], можно предположить, что в живых организованных системах Ge также может участвовать в физиологических процессах в виде наноразмерных структур. Это привело к необходимости расширения исследований влияния различных условий и характера синтеза НЧ Ge на формирование наноструктур с заданными свойствами и функциональной активностью, использованных в работах [13–16].

Использование водорастворимых солей германия эниогерм (Эн) и герматронол, радиационно-химического (RadChem) и химического (Chem)

методов восстановления ионов Ge в обратно мицеллярных растворах, включая процессы “самоорганизации” Self-Assembly (SA), не требующих катализаторов или воздействия ионизирующего излучения, позволило подтвердить, что любые примесные соединения и условия эксперимента влияют на формирование, свойства и функциональную активность НЧGe [17]. Поэтому было решено провести синтез НЧGe методом лазерного воздействия (laser ablation) на образцы Ge (bulk targets) в растворах ацетона с твердыми германиевыми мишенями. Авторы работ [18–21], используя лазерную абляцию в органических растворителях, подтвердили формирование НЧGe различными физико-химическими методами.

В работе [22] методом жидкостной хроматографии с одновременной регистрацией оптических и электрических свойств были зарегистрированы после разделения НЧ Ge размером 2–10 нм. Важные результаты по НЧ Ge, как эмиттеров света в видимой области, были получены после облучения в течение 3 ч Ge мишени в октене-1 в отсутствие O₂ под воздействием Nd/YAG лазера [23].

Однако, несмотря на опубликованные результаты по синтезу НЧ Ge методом laser ablation, для выяснения механизма первичных актов “зарождения” НЧ и управления их свойствами необходимы дополнительные экспериментальные ис-

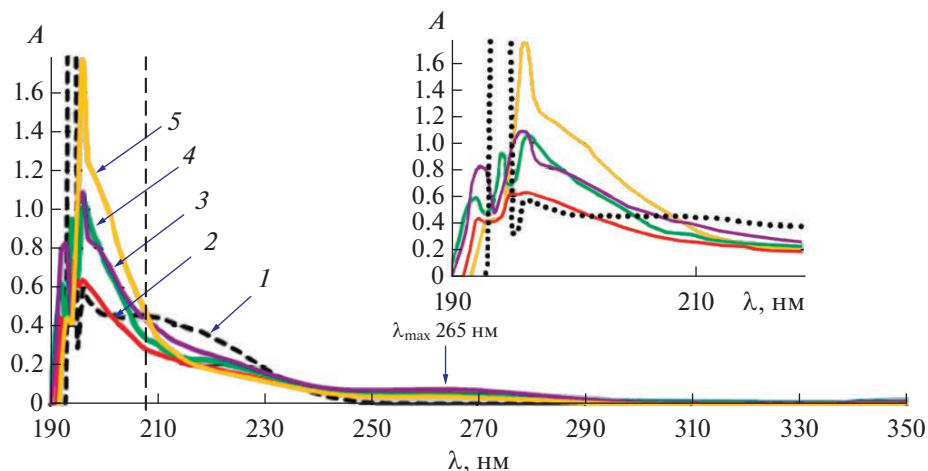


Рис. 2. Спектры оптического поглощения НЧ Ge RadChem в водно-органическом растворе: Эн/Н₂O в 0.15 М АОТ/изооктан при [Эн] = 0.136 мМ, (ω_{ОМР} = 5.0) после барботирования He в течение ~15 мин и облучения при дозах, кГр: 0 (1); 2.0 (2); 4.0 (3); 6.0 (4); 8.0 (5). Регистрация спектров через 7 дней после облучения, включая образец при D = 0 кГр (НЧ GeSA). Раствор сравнения – 0.15 М АОТ/изооктан.

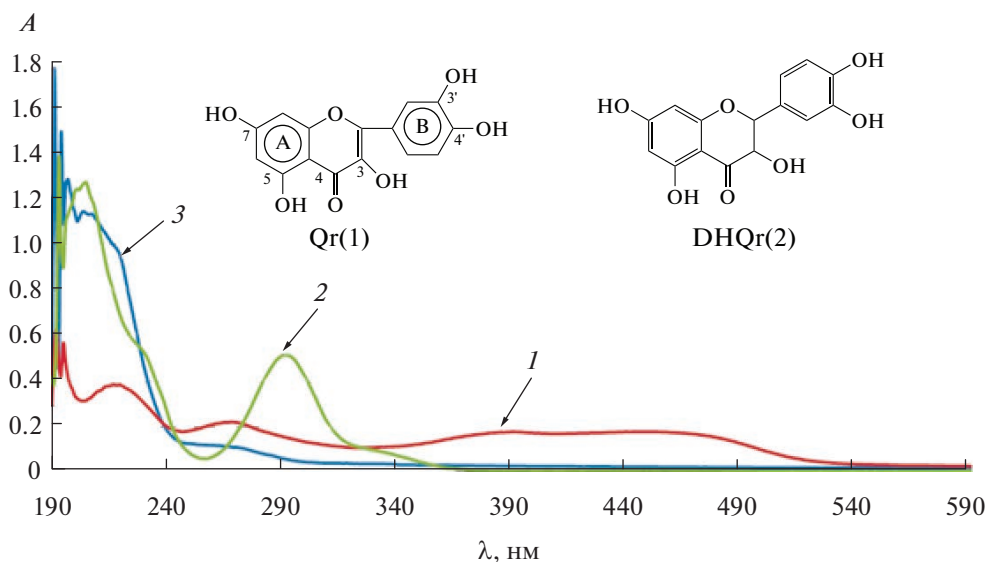


Рис. 3. Спектры оптического поглощения ОМР (0.15 МАОТ/изооктан) НЧ Ge при ω = 5.0: НЧ GeChem (200 mkM Qr) (1); НЧ GeChem (200 mkM DHQr) (2), RadChem (3). Концентрации исходных водных растворов эниогерма были равными 0.136 М, размер кюветы L = 1 мм.

Спектрофотометрически оксокомплексы (а) и металлооксокомплексы (б) определяются по bathochromному смещению полосы оптического поглощения флавоноида Qr, 3,5,7,3',4' – пентагидроксифлавона [7].

На рис. 3 представлены спектры оптического поглощения НЧ GeChem в присутствии Qr (1), DHQr (2) и формирование НЧ GeRadChem – спектр (3).

Для дигидрокверцетина (DHQr), в молекуле которого нет одной двойной связи в кольце, образование комплекса фиксируется в УФ-области, где

поглощают и НЧ Ge, но полоса DHQr (λ ~ 290 нм) восстанавливается почти сразу. Другая картина наблюдается для ОМР с Qr: через 7 дней после введения раствора соли полосы оксокомплекса Qr (λ_{max} ~ 383 нм) и металлооксокомплекса (λ_{max} ~ 450 нм) исчезают, а поглощение НЧ Ge при (λ ~ 195 и ~215 нм) растет до значения ОП >1.0 [17].

Эти результаты подтверждают, что для исследования природы и функциональной активности образующихся наноразмерных частиц необходимо уже на первичных актах восстановления ионов оценивать мельчайшие изменения условий и их

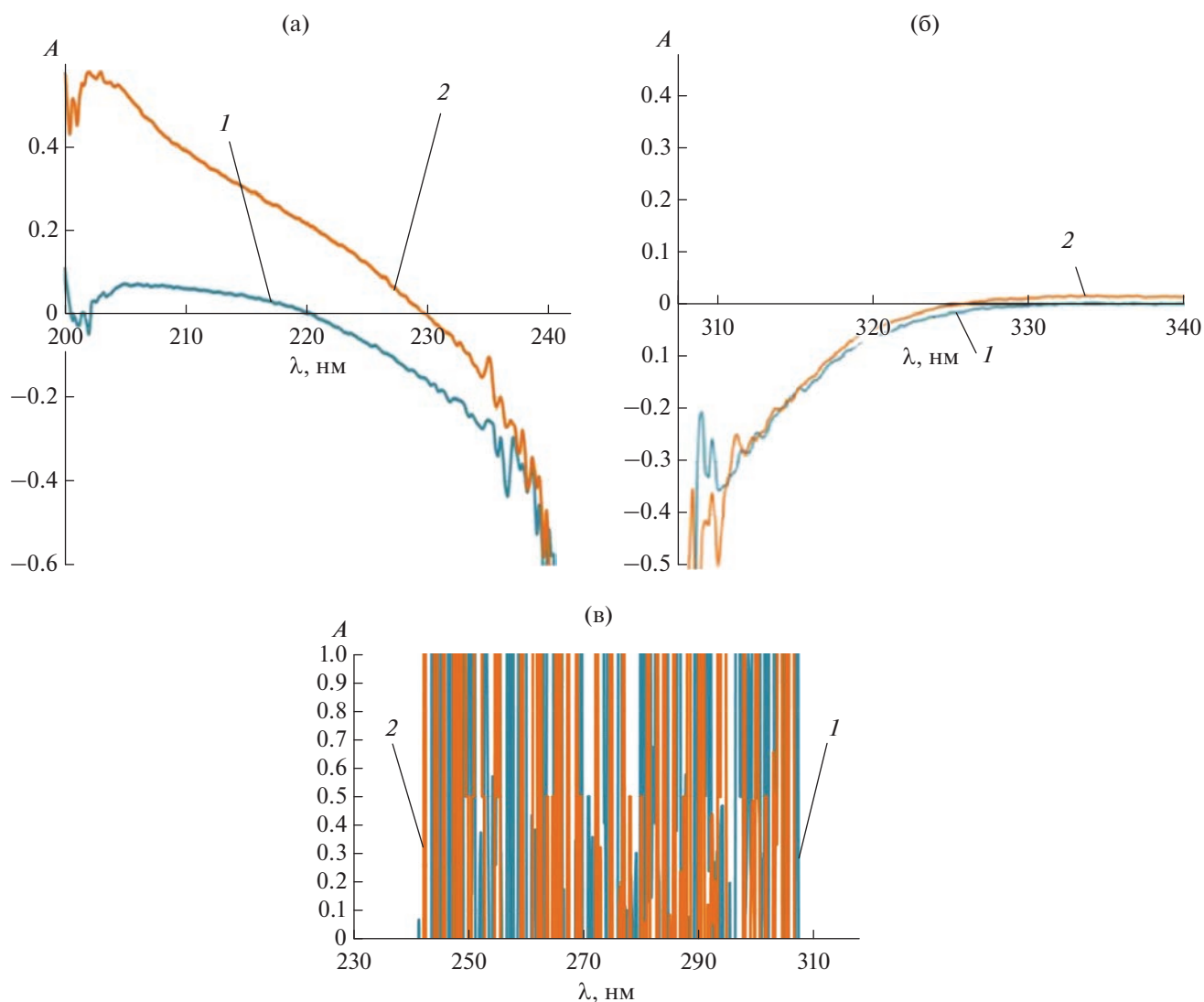


Рис. 4. Спектры ОП НЧ германия в ацетоне после облучения LGreen лазером ($\lambda = 530$ нм) при $\Delta t = 30$ мин в аэробных (1) и анаэробных условиях (2). Фрагментами (а), (б), (в) выделены разные участки спектров. Измерение спектров в кварцевой кювете $L = 1$ мм, раствор сравнения – исходный ацетон.

влияние на последующие реакции формирования наночастиц.

ФОРМИРОВАНИЕ НЧ Ge ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Облучение проводили при $T_{\text{комн}}$ и постоянной мощности лазера в ИК области NIR или зеленого LGreen от 30 до 240 мин без внешней подсветки.

На рис. 4 представлены спектры оптического поглощения образцов ацетона после облучения лазером (Green L, $\lambda = 530$ нм) в течение 30 мин в присутствии пластинки МКGe. Для выяснения влияния присутствия кислорода на формирование Ge-наночастиц образец 1 был облучен в

аэробных условиях, а образец 2 облучен после удаления воздуха барботированием раствора гелием ($\Delta t > 30$ мин). Более высокое значение ОП полосы поглощения при $\lambda_{\text{max}} \sim 210$ нм в образце 2 позволяет сделать вывод о более интенсивном формировании НЧ Ge в анаэробных условиях.

На рис. 5 представлены данные АСМ-измерений образцов НЧ Ge в ацетоне после облучения лазером Green L.

В образце ацетона, облученного LGreen в присутствии пластинки МК Ge в течение ($\Delta t = 30$ мин) в аэробных условиях, высоты частиц ~ 8 до 25 нм; в образце ацетона в присутствии пластинки МКGe после облучения в анаэробных условиях от ~ 1 до 3 нм.

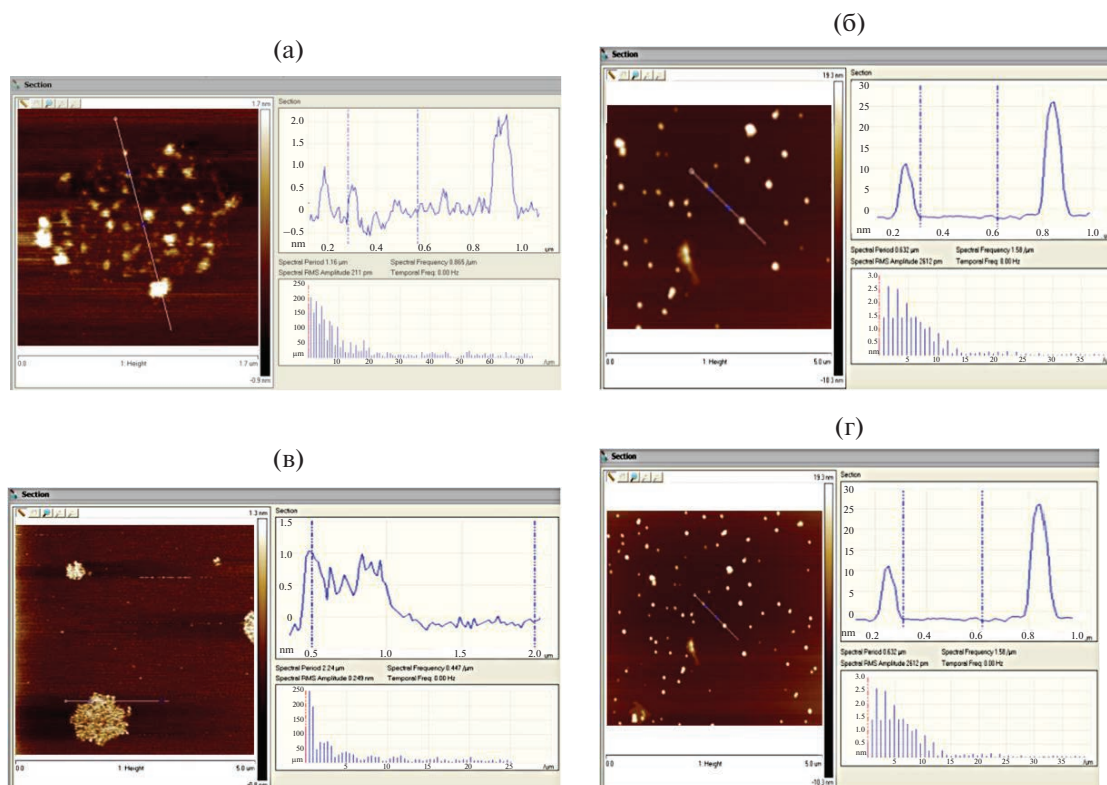


Рис. 5. Результаты АСМ-измерений образцов НЧ Ge в ацетоне после облучения лазером Green L в течение 30 мин в аэробных (а), (б) и анаэробных условиях (в) и (г).

Анализ полученных результатов АСМ-измерений (формы частиц и их размеров) позволяет сделать вывод о влиянии кислорода воздуха на характер и интенсивность *первичных* стадий формирования Ge-содержащих наноструктур, что подтверждается разным характером и значениями ОП ОМР НЧ Ge в УФ-области от ~200 до 300 нм.

СИНТЕЗ НЧ Ge ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛАЗЕРА IR L ($\lambda = 1064$ нм)

Оптические характеристики спектров НЧ Ge в диапазоне 200–240 нм сразу после IRL-облучения ацетона в присутствии пластинки МК Ge представлены на рис. 6. Можно проследить зависимость изменения спектров ОП от времени экспонирования образцов в *аэробных* условиях и последующего выдерживания образцов в течение 7 сут.

При сравнении спектров НЧ Ge в УФ-области, полученных при воздействии лазеров LGreen (рис. 4) и IRL (рис. 6) в течение 30 мин можно видеть, что более высокая *эффективность* формирования НЧ Ge в *аэробных* условиях регистрируется при облучении IR лазером.

На основании ранее представленных спектров поглощения НЧ Ge, синтезированных разными

методами [17], можно сделать вывод о том, что полосы поглощения на спектре (рис. 6) при $\lambda_{\max} \sim 202$ нм отвечают поглощению НЧ Ge. Совершенно очевидно, что в присутствии O_2 содержание НЧ Ge будет ниже. Следует подчеркнуть, что в этих образцах наблюдается очень сложная структура спектра оптического поглощения в области от 240 до 340 нм, что требует дополнительных исследований.

На рис. 7 приведены спектры оптического поглощения образца *ацетона*, облученного ($\Delta t = 60$ мин) в присутствии диска МК Ge лазером IR в отсутствие кислорода и данные по размерам НЧ Ge, полученных методом ДРС.

Изменение спектров оптического поглощения ацетоновых растворов, облученных IRL в присутствии пластинки МК Ge после удаления кислорода в течение 30 мин (1) и 60 мин (2) сразу после облучения и через 7 суток выдерживания этих образцов в аэробных условиях (1*) и (2*), соответственно, представлено на рис. 8.

Через 7 сут выдерживания образцов в аэробных условиях без доступа внешнего освещения были проведены измерения этих же образцов методом дисперсионного лазерного анализа (ДРС), которые показали, что размеры регистрируемых

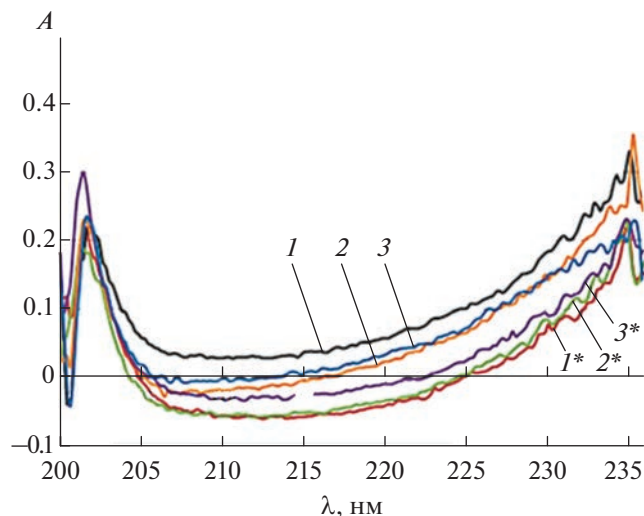


Рис. 6. Спектры оптического поглощения НЧ Ge сразу после облучения IR L образцов в течение Δt мин: 30 (1), 60 (2) и 90 (3) и через 7 дней хранения образцов в *аэробных условиях* без доступа света облученных образцов – 30 мин (1*), 60 мин (2*) и 90 мин (3*). Измерение спектров в кварцевой кювете $L = 1$ мм, раствор сравнения – *исходный* ацетон.

наноструктур уменьшились для всех образцов (рис. 9).

Можно отметить, что при увеличении времени экспозиции лазера до $\Delta t = 60$ мин регистрируются более мелкие наночастицы, это различие размеров НЧ Ge сохраняется при выдерживании образ-

цов в аэробных условиях в течение нескольких суток.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ АЦЕТОНА ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОМ IRL

Подтверждение формирования НЧ Ge, спектры оптического поглощения которых зарегистрированы в УФ-области спектра [17], получено. Но этих результатов совершенно недостаточно, чтобы четко идентифицировать наночастицы оксидов германия ($\lambda_{\max} \sim 265$ нм), поглощение которых от 230 до 330 нм было зарегистрировано [23]. Поэтому проведено лазерное IR облучение исходного ацетона в течение 30 мин в присутствии кислорода воздуха. Зарегистрированные спектры ацетона, исходного и после лазерного облучения представлены на рис. 10а.

Таким образом, представленные спектры ацетона имеют четкий максимум при $\lambda_{\max} \sim 265$ нм.

На рис. 11 представлены данные АСМ измерений контрольного образца ацетона после барботирования He.

Наличие в ацетоне наноструктурных образований подтверждается данными ДРС, представленными на рис. 12. В зависимости от времени облучения лазером IRL и образцов ацетона в присутствии мишени ПМК Ge зарегистрированы НЧ, размер которых увеличивается пропорционально времени облучения. Увеличение размеров наночастиц в зависимости от времени облучения чет-

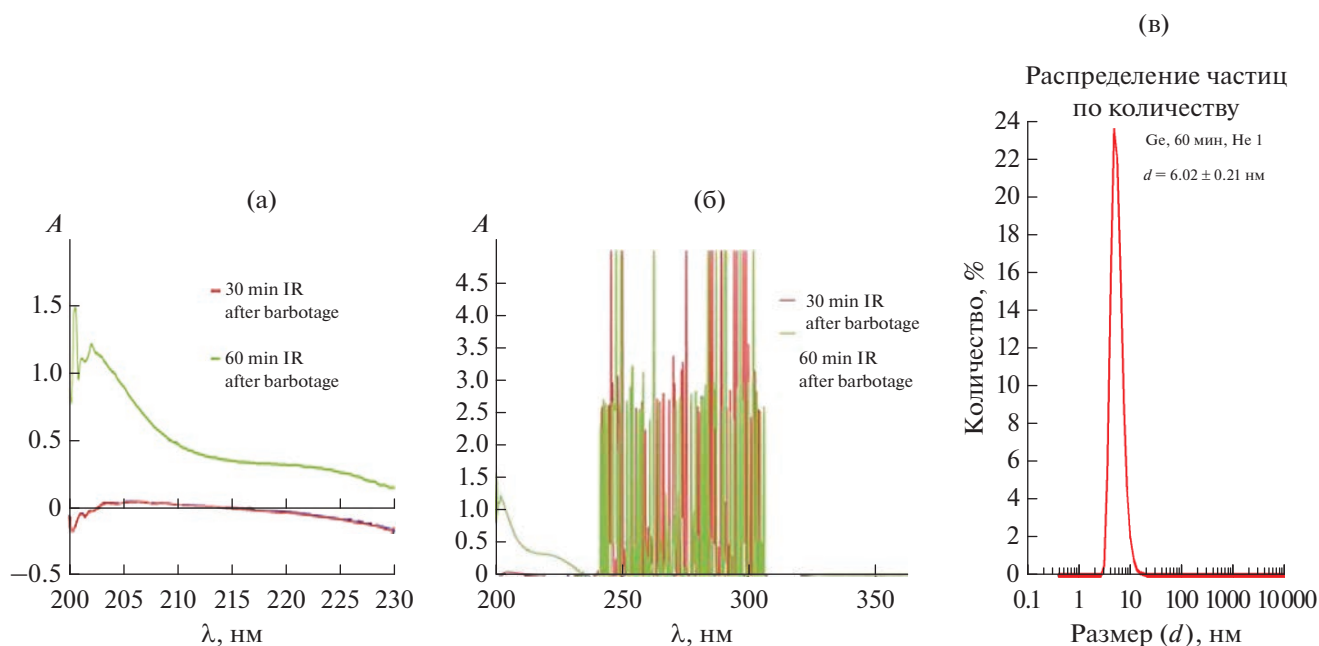


Рис. 7. Спектр ОП образца ацетона, облученного (а), (б): $\Delta t = 30$ и 60 мин в присутствии диска МК Ge лазером IR после удаления кислорода; (в) данные ДРС, 60 мин, $d = 6.02 \pm 0.21$ нм.

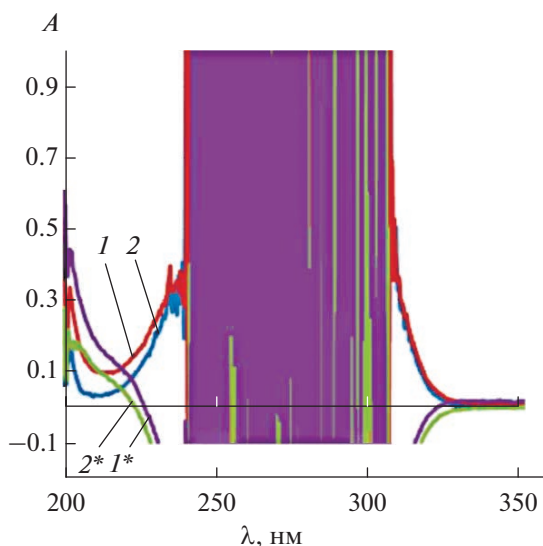


Рис. 8. Спектры оптического поглощения ацетоновых растворов после удаления кислорода сразу после облучения и через 7 дней выдерживания образцов в аэробных условиях.

ко просматриваются для 30 и 240 мин и для чистого ацетона, и для ацетона с мишенью ПМК Ge. Но в ацетоне наноструктурные частицы имеют большие размеры, чем в ацетоне с мишенью. Удивительно то, что при разных дозах облучения наноструктур в ацетоне и в ацетоне с НЧ Ge по разме-

рам находятся в одном диапазоне и нет других включений, но всегда размеры НЧ в ацетоне несколько больше.

Полученные результаты подтверждают, что наноструктурные образования и в чистом ацетоне, и в ацетоне с НЧ Ge позволяют рассматривать измеренные наноразмерные структурные как возможность образования в ацетоне своеобразных химических соединений – *клатратов*. Соединения включения, которые описаны как пространные объединения валентно насыщенных молекул без какого-то изменения связей в них. Формально рассматриваются в работе [24], как комплексные соединения, компоненты которых соединяются без участия обычной химической связи. Важно, что происходит полное включение одного компонента в устойчивую структуру, образованную молекулами другого “хозяина”, которые способны образовывать структуры с полыми пространствами, достаточных размеров для включения молекул “гостей”. В нашем случае в качестве гостя выступают НЧ Ge и молекулы из газовой фазы.

Ранее учеными Института электрохимии под руководством проф. Н.А. Бах [25] были получены важные результаты, подтверждающие влияние степени *упорядоченности* облучаемой системы на увеличение выходов продуктов в радиационно-химических процессах *в ацетоне*. Но этот эффект пропал при очень незначительном повышении температуры или изменения концентрации Ac

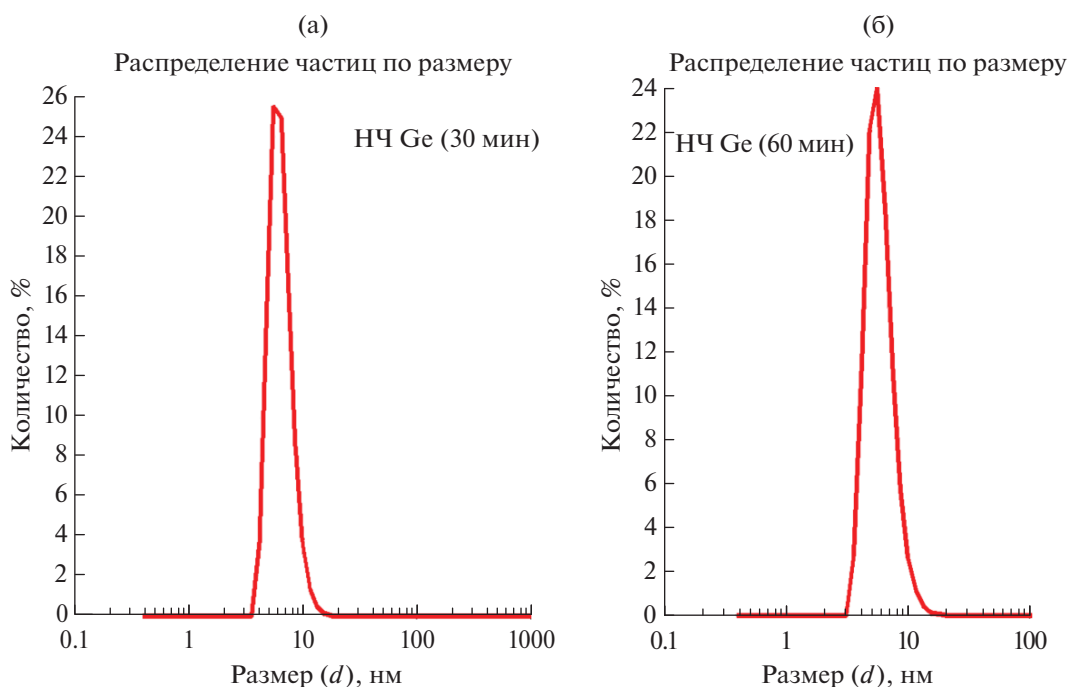


Рис. 9. Результаты ДРС-измерений: средний размер – 6.554 ± 0.19 нм, $d_{ср.} = 6.018 \pm 0.2075$ нм, через 7 с $d_{ср.} = 8.5 \pm 0.3$ нм, через 7 с $d_{ср.} = 5.7 \pm 0.3$ нм, затем $d_{ср.} = 6.7 \pm 1.2$ нм.

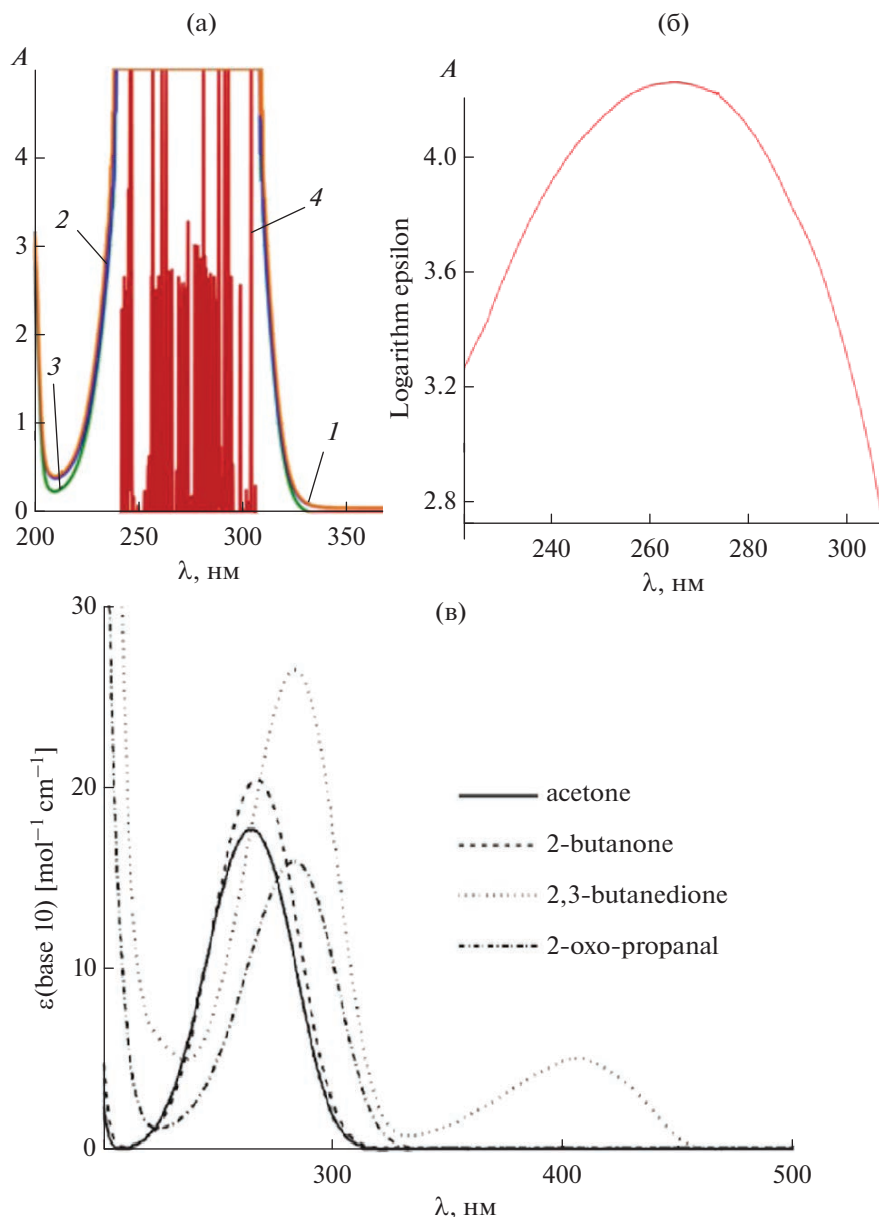


Рис. 10. Спектры оптического поглощения ацетона: (а) 1 – Ас (исх.); 2 – Ас после IR L-облучения в течение 30 мин, относительно воздуха; 3 – относительно кварцевой кюветы; 4 – Ас IR обл. – относительно кюветы с ацетоном, $L = 1$ мм; (б) спектр ацетона из работы [31]; (в) спектр ацетона, работа [32].

при добавлении воды за счет нарушения *состояния* исходной жидкости, обусловленной существованием лабильных *упорядоченных* структур. Однако прямых экспериментальных доказательств о существовании таких структур в ацетоне в тех работах не было.

Для объяснения спектров оптического поглощения в исходном ацетоне и в ацетоне после воздействия лазерного излучения, но в присутствии пластинок МК Ge, были использованы спектры оптического поглощения, представленные на рис. 13. Безусловно, при измерениях спектров в

кварцевых ячейках длиной оптического пути $L = 1$ мм *полного* спектра не могли получить, но спектр в ячейке $L = 0.57$ мм, представленный в работе [25], позволяют продолжить анализ получаемых результатов.

Следует обратить внимание на то, что стабильность наноструктур облученного ацетона, особенно в облученном (30 мин), выше в присутствии НЧ Ge, чем в образце чистого ацетона (рис. 13в). Можно согласиться с авторами [24], которые наблюдаемый эффект стабилизации связывали с упрочнением самоорганизованной структуры

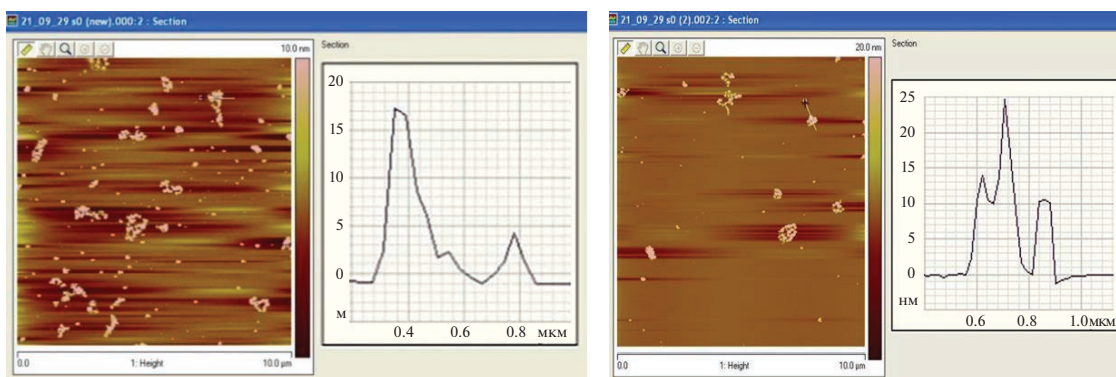
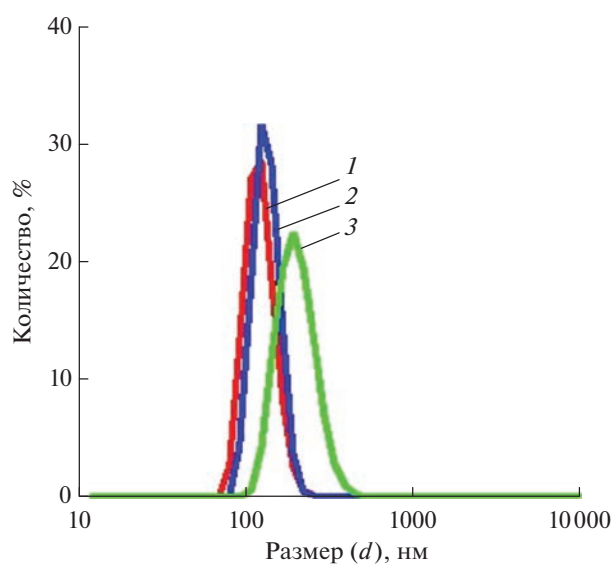
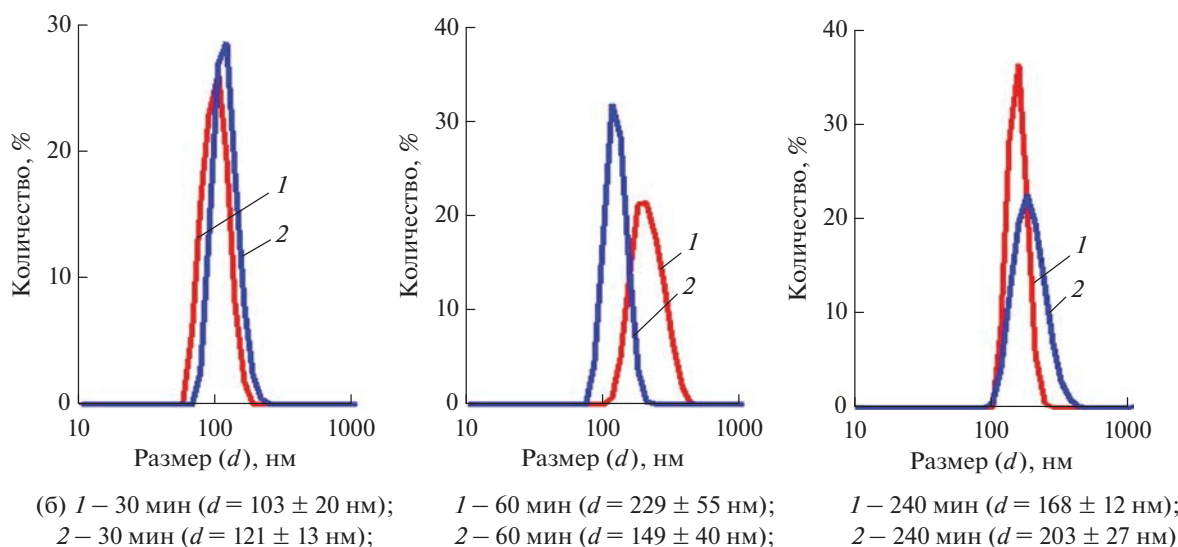


Рис. 11. Результаты АСМ-измерения: (а) контрольный образец ацетон – чистый, размеры наночастиц от 4–16 нм, но этих частиц значительное количество; образец (б), используемый в качестве сравнения в течение некоторого времени, зарегистрированы редкие частицы размером 10–25 нм.



(а) 1 – 30 мин ($d = 121 \pm 13$ нм); 2 – 60 мин (149 ± 40 нм); 3 – 240 мин (203 ± 27 нм)



(б) 1 – 30 мин ($d = 103 \pm 20$ нм); 2 – 30 мин ($d = 121 \pm 13$ нм); 1 – 60 мин ($d = 229 \pm 55$ нм); 2 – 60 мин ($d = 149 \pm 40$ нм); 1 – 240 мин ($d = 168 \pm 12$ нм); 2 – 240 мин ($d = 203 \pm 27$ нм)

Рис. 12. (а), (б). Результаты ДРС-измерений размеров наноструктурных образований в зависимости от Δt , времени облучения лазером IR L в течение $\Delta t = 30, 60$ и 240 мин: (а) в ацетоне; (б) в ацетоне в присутствии ПМК Ge – 1 и для сравнения – 2 в ацетоне.

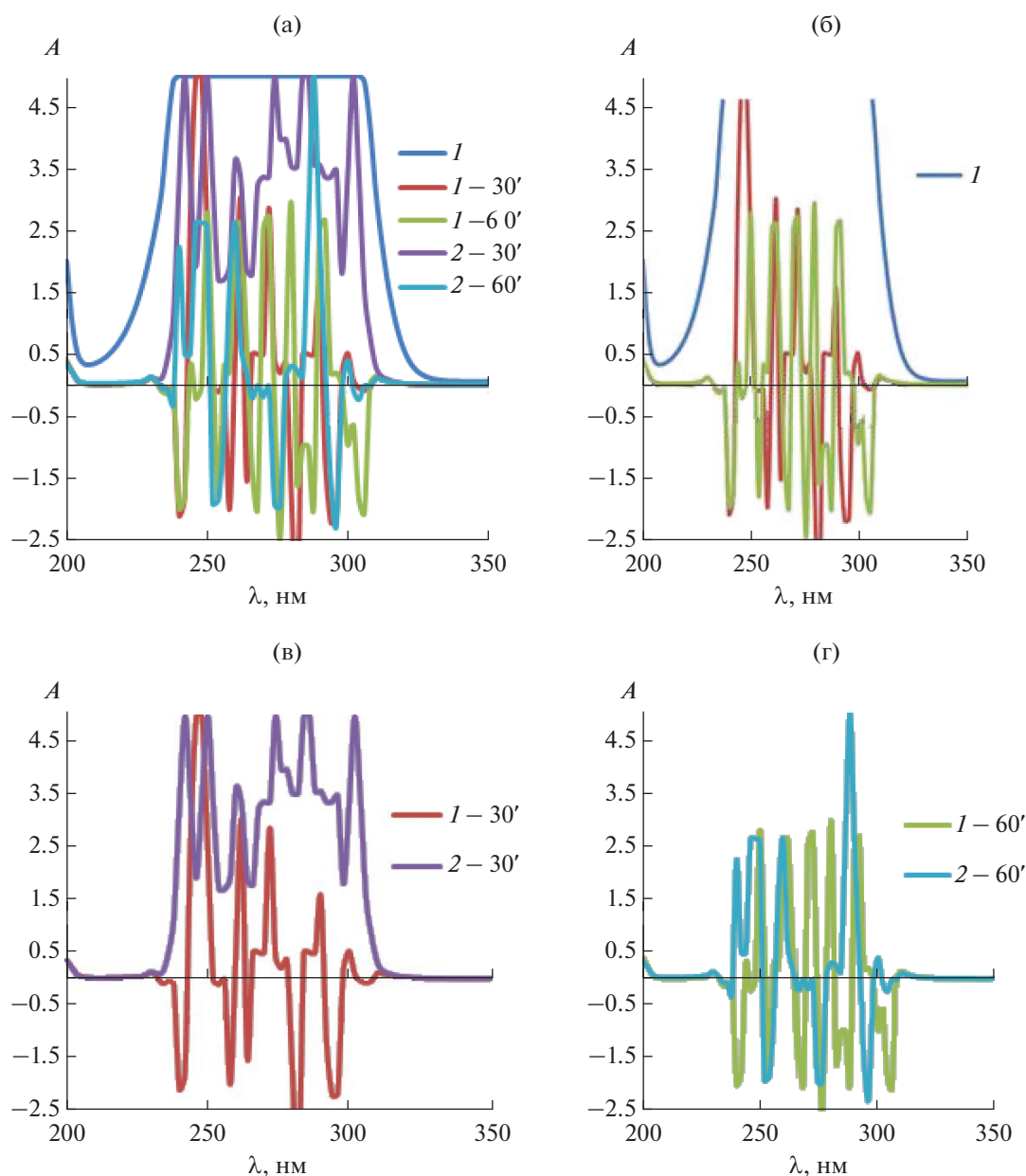


Рис. 13. Спектры оптического поглощения ацетона (а): Ас исходного – 1, облученного IRL – 1 (30 мин) и – 1 (60 мин) и облученного в присутствии ПМК Ge: 2 – 30 мин и 2 – 60 мин (б) спектры Ас и спектры Ас, облученного в присутствии ПМК Ge IRL $\Delta t = 30$ мин и 60 мин; (в) спектры поглощения облученного ацетона (1 – 30) и облученного ацетона в присутствии ПМК Ge (2 – 30), $\Delta t = 30$ мин; (г) $\Delta t = 60$ мин.

“клатрата” за счет второго компонента – *гостя*. Фактически использование лазерного облучения позволило вскрыть квазикристаллическую структуру ацетона на основании хорошо разрешенных полос поглощения наноструктур в чистом ацетоне и большей интенсивности в ацетоне в присутствии НЧ Ge.

Для подтверждения структурных особенностей ацетона и нарушения его интенсивности полосы оптического поглощения после введения добавки воды были проведены следующие спек-

трофотометрические измерения, в результатах которых проявился особый эффект добавления воды (рис. 14).

Измерения спектров проводили в кварцевых ячейках ($l = 1$ мм). К 1 мл ацетона добавляли от 50 мкл до соотношения ацетона (Ас) и воды ($w = 12.5$). Раствором сравнения была дистиллированная вода. Важно подчеркнуть, что при всех разбавлениях водой снижается только интенсивность характерной полосы поглощения ацетона в области от 240 до 340 нм без нарушения структу-

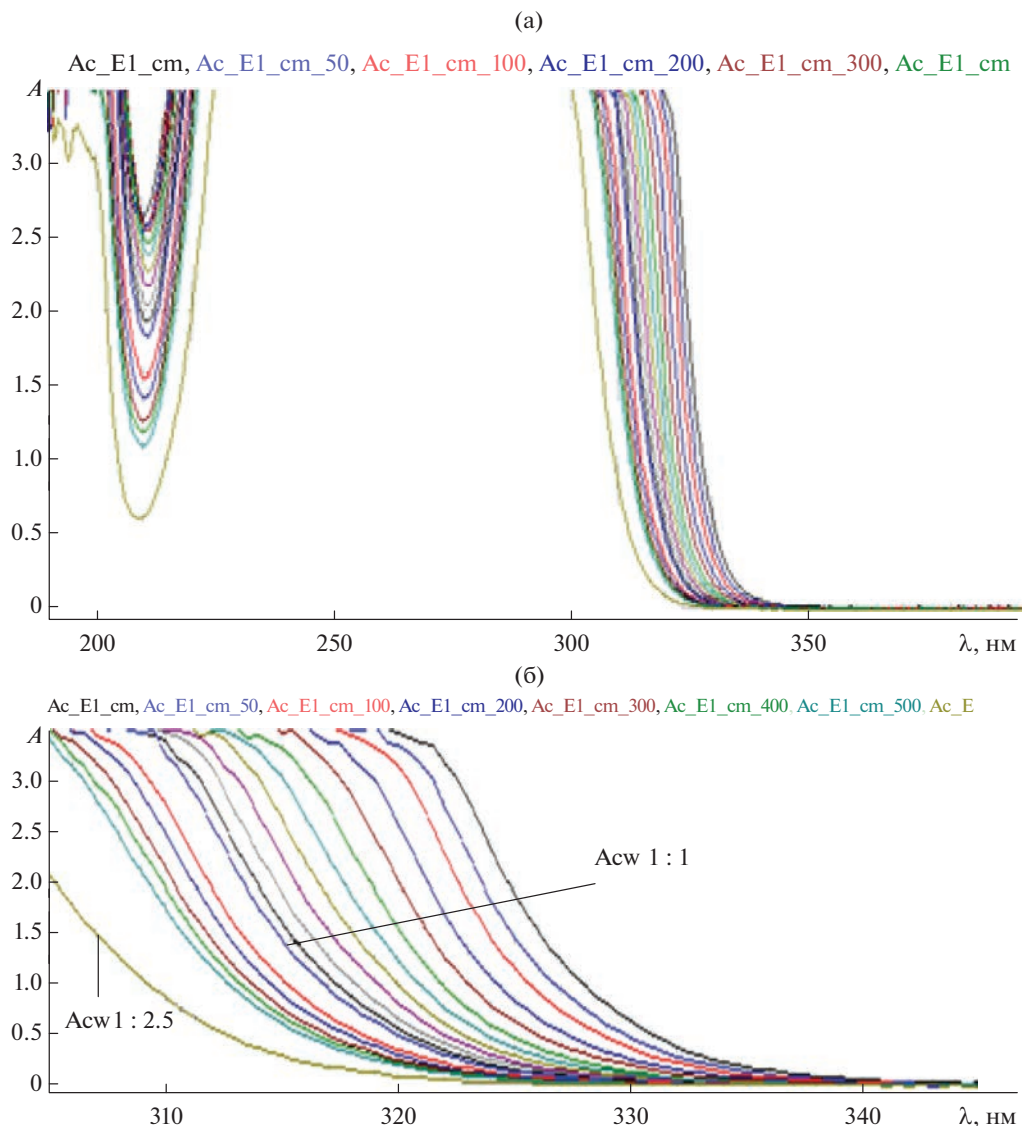


Рис. 14. Изменение интенсивности полос оптического поглощения образцов ацетона, $A_{св}$ от 195 до 350 нм в зависимости от количества добавленной воды (свежая дистиллированная) (а) и оптического поглощения в диапазоне от 300 до 350 нм (б).

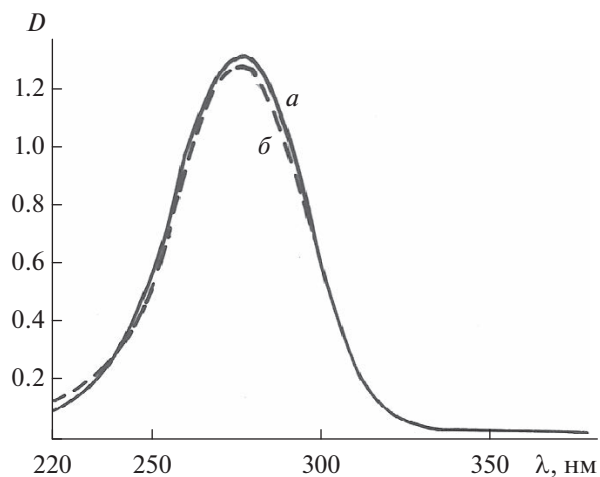


Рис. 15. Спектры собственного поглощения для $n-\eta^*$ оптического перехода в ацетоне, $L = 0.57$ мм: (а) после очистки; (б) после обработки цеолитом и последующей очистки (рисунок из диссертации Г.Л. Борисенко, 1975 г.).

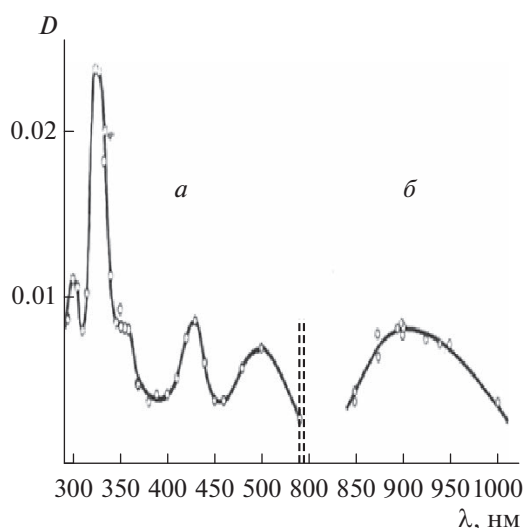


Рис. 16. Спектры поглощения в вакуумированном метилэтилкетоне через: (а) $\Delta t = 50$ мкс после импульса, а при $\Delta t < 50$ мкс сигналов нет; (б) сразу после 40-наносек. импульса электронов, позже — полоса поглощения в этой области спектра — не наблюдаются. Доза /имп. = 2.9×10^{17} эв/мл.

ры полосы с $\lambda_{\max} \sim 279\text{--}280$ нм. Совершенно другое изменение характера спектра происходит, если производится воздействие лазерного облучения на ацетон — исчезает характерная полоса поглощения исходной “клатратной” структуры. Однако, как эти химические соединения могут образовываться в ацетоне за счет самоорганизации и через какие промежуточные стадии кроме названия “своеобразных химических соединений” — других пояснений в литературе не было [24]. Поэтому в Заключение будут использованы

результаты работ по импульсному радиолизу ацетона [25–30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В литературе под термином “Соединения включения” понимали “пространственные объединения” валентно насыщенных молекул без какого-либо изменения связей в них. Фактически полагают, что включение является результатом способности одного соединения, вследствие его специфических стерических свойств, пространственно включать другое. Однако, это не помогает определить основное свойство ацетона образовывать такую самоорганизованную структуру. Подтверждение “клатратной” структуры ацетона можно получить из анализа результатов, полученных при использовании метода импульсного радиолиза со скоростной регистрацией короткоживущих частиц в ацетоне [28]. Спектры поглощения очищенного ацетона, который использовался для образцов при импульсном радиолизе, были измерены в кварцевой ячейке $L = 0.57$ мм представлены на рис. 15.

Представленные данные на рис. 17 позволяют зарегистрировать эффект молекулярного кислорода (из воздуха), на образование и стабилизацию разных промежуточных частиц радиолиза кетонов и последующее содержание самоорганизованных комплексов с переносом заряда, которые регистрируются и после облучения.

Независимым подтверждением образования комплексов с частичным переносом заряда, КПЗ в мксек диапазоне являются результаты сравнения наведенной электропроводности и спектров оптического поглощения в области 300–350 нм в

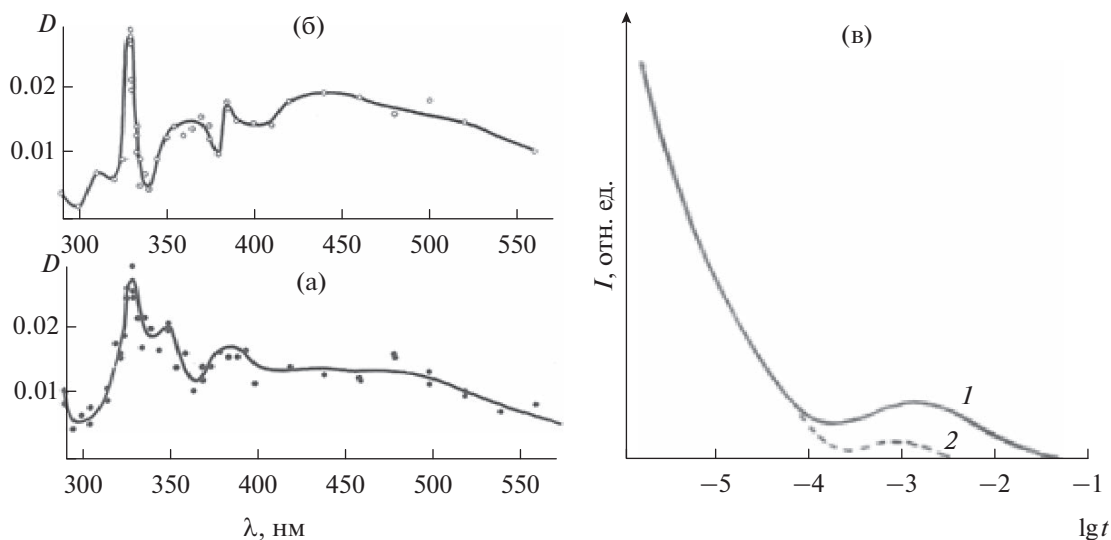


Рис. 17. Спектры оптического поглощения исходного ацетона (а) и после *высушивания* (б); Δt регистрации сигналов при разных длинах волн >50 нс; (в) *Релаксационные кривые тока*: (1) вакуумированный образец: спад тока до 100 нс и подъем и — снова спад в мкс диапазоне; (2) в присутствии воздуха после облучения потоком ускоренных электронов. Доза /имп. 4×10^{17} эв/мл.

облученных алкилкетонах (а) и (б) после >50 нс после импульса электронов (рис. 16, 17 [28–30]).

Показано (в, рис. 17), что сразу после 40 наносекундного импульса регистрируется снижение концентрации заряженных частиц, а в диапазоне после минимального значения – подъем, затем наблюдается полный спад. В работах [26–29] представлены результаты, которые позволяют сделать вывод, что на рис. 17 полосы ОП от 300 до 500 нм, которые регистрируются только через 50 мкс после конца импульса, принадлежат лабильным комплексам с частичным переносом заряда. Следует обратить внимание на очень важное совпадение значений в микросекундном диапазоне регистрации оптического поглощения КПЗ в ацетоне после облучения и в этом временном диапазоне увеличение содержания заряженных частиц за счет распада комплексов (рис. 17).

В заключение нужно подчеркнуть, что в литературе обсуждается важное значение клатратов, соединений включения, но в основном для водных растворов органических соединений, а представленные данные относятся к чистому ацетону, но результаты по влиянию воды включены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукевич Э.Я., Гар Т.К., Игнатович Л.М., Миронов В.Ф. Биологическая активность соединений германия. Рига. “Зинатне”. 1990. 191 с.
2. Башкирова С.А., Доскоч Я.Е., Бессонов А.Е., Березовская И.В., Калмыкова А.Е. // СВОП. 2009. № 9. С. 61–65.
3. Asai K. // Organic Germanium. Miracle Cure. 1980. 84 p.
4. Исаев А.Д., Башкирова С.А. Патент RU2293086. Приоритет 2005.
5. Ревина А.А., Башкирова С.А., Доскоч Я.Е., Зайцев П.М. Антиоксидативная активность нового германий-органического комплекса “Эниогерм” // Труды конференции по проблеме “Окисление, окислительный стресс, антиоксиданты”, ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН. М. 2008. С. 269.
6. Королев Ю.М., Башкирова С.А. // Доклады Академии наук. 2010. Т. 453. № 6. С. 764–766.
7. Ревина А.А., Башкирова С.А., Зайцев П.М. Новые германийорганические комплексы поликарбоновых кислот: полифункциональные антиоксиданты. Материалы V Российской научно-практической конференции “Актуальные проблемы нанобиотехнологии”. Москва, РАЕН. 2009. С. 115, 116.
8. Ming-Hsing Lin, Nsu-Sheng, Pei-Ming Yang, Meng-Yen Tsai, Tson-Pyng Perng, Lin-Yuan Lin // Int. J. Radiat. Biol. 2009. V. 85. № 3. P. 214–220.
9. Nicolis G., Prigogine I. Self-Organization in Nonequilibrium Systems / John Wiley & Sons, N.Y. 1977.
10. Структурная самоорганизация в растворах и на границе фаз / Отв. ред. А.Ю. Цивадзе. М.: Изд-во “ЛКИ”, 2008.
11. Rodnikova M.I. Buljonkov V.A. in Structural self-organization in solutions and at the phase boundary / Resp. ed. A.Yu. Tsvadze. M.: Publishing house LKI, 2008. P. 544.
12. Grzelczak Marek, Vermant Jan, Furst Eric M. et al. // www.acsnano.org. ACSNano. 2010.
13. Wilcoxon J.P., Provencio P.P., Samara G.E. Synthesis and optical properties of colloidal germanium nanocrystals. Physical Review B. 2001. V. 64. № 3. Article ID 035417.
14. Xing Chen, Qua Cai, Jing Zhang, Zhongjun Chen, Wei Wang, Ziyu Wu, Zhonghua Wu // Materials Letters. 2007. V. 61. P. 535–537.
15. Кузнецов М.А., Ревина А.А., Павлов Ю.С., Чекмарев А.М. Влияние дозы облучения на формирование и физико-химические свойства наночастиц германия // X Конф. Молодых ученых ИФХЭ РАН “ФИЗИКОХИМИЯ – 2015”, Тезисы МФХЭ РАН, Москва, 2015, 105.
16. Prabakar. S., Shiohara A., Yanada S., Fujioka K., Yamamoto K., Tilley R.D. // Chemistry of Materials. 2010. V. 22. № 2. P. 482–486.
17. Ревина А.А., Суворова О.В., Смирнов Ю.В., Павлов Ю.С. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2022. Т. 58. № 3. С. 306–322.
18. Carolan Darrgh, Doyle Hugh // J. Nanomaterials. 2015. Article ID 506056. 9 pages. <http://dx.doi.org//506056>. <https://doi.org/10.1155/2015>
19. Shirahata Naoto, Hirakawa Daigo, Masuda Yoshitake, Sakka Yoshio // Langmuir. 2013. V. 29. № 24. P. 7401–7410.
20. Jun Liu, Changhao Liang, Zhenfei Tian, Shuyuan Zhang, Guosheng Shao // Scientific Reports. 2013. V. 3. Article number: 1741. <https://doi.org/10.1038/step01741>
21. Vadavalli Saikiran, Valligatla Sreeramulu, Neelamraju Bharati, Dar Mudasar H., Chisera Alessandro, Ferrari Maurizio, Desai Narayana Rao // Frontiers in Physics. Optics and Photonics. October. 2014. V. 2. Article 57. P. 1–9.
22. Bruno Pescara, Katherine A. Mazzio. Morphological and surface state challenges in Ge nanoparticle applications.
23. Renkes G.D., Wettack F.S. // Journal of the American Chemical Society. 1969. V. 91(26). P. 7514–7515. <https://doi.org/10.1021/ja01054a051>
24. Шубин В.Н., Кабакчи С.А. “Клатратные соединения” в монографии Теория и методы радиационной химии воды. Изд-во “Наука”. Москва. 1969 г. С. 216.
25. Ермакова Г.Л., Ларин В.А., Ревина А.А., Бах Н.А. // Химия высоких энергий. 1969. Т. 3. № 1. С. 94.
26. Bach N.A., Revina A.A., Vannikov A.V. Pulse and Electrical Methods in Investigation of Certain Radiation Induced Reactions // Proc. of 4-th Congress of Rad. Research. Evian England. 1970. P. 449.
27. Revina A. Transient Species of Alkylketone Radiolyses // Proceedings of 10th Conference on Radioisotopes. 1971. Japan AIF.
28. Bach N.A., Borisenko G.L., Kostin A.K., Revina A.A. // Int. J. Radiat. Phys. Chem. 1972. V. 4. № 2. P. 121–134.
29. Борисенко Г.Л., Бах Н.А. Исследование методом импульсного радиолиза стабилизации зарядов в жидких алкилкетонах // Симпоз. по радиационной химии водных систем (Москва, 1973 г.): Тез. докл. М.: Наука, 1973. С. 47.
30. Борисенко Г.Л., Бах Н.А. // Химия высоких энергий. 1975. Т. 9. № 3. С. 198–202.
31. NIST Chemistry, WebBook (<http://webbook.nist.gov/chemistry>).
32. Mattias Schutze, Hartmut Herrman // Phys. Chem. Chem. Phys. 2004. V. 6. P. 965–971.