Письма в ЖЭТФ, том 122, вып. 3, с. 184 – 190

Микроскопический механизм денатурации белков и нуклеиновых кислот бактерий P. aeruginosa при резонансном поглощении фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 6 мкм

С. И. Кудряшов[+1)], *С. Н. Шелыгина*[+1)], *В. О. Компанец*[*], *С. В. Чекалин*[*], *И. М. Ефремов*[×∘], *А. В. Столяров*[×], *Э. Р. Толордава*[+]

[+] *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия*

[*] *Институт спектроскопии РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия*

[×] *Химический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия*

[∘] *Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН, 119334 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 17 июня 2025 г.
После переработки 30 июня 2025 г.
Принята к публикации 3 июля 2025 г.

Образцы плактона бактерий P. aerugionosa на ИК-прозрачной кремниевой подложке впервые исследованы методом спектроскопии динамического пропускания в отношении фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 6 мкм и варьируемой пиковой интенсивностью в диапазоне $3{-}5\cdot10^2$ ГВт/см^2 – с превышением порога $\approx 3\cdot10^2$ ГВт/см^2 для неразрушающей инактивации данных бактерий. С ростом интенсивности лазерного излучения поочередно наблюдаются выгорание полосы резонансного гармонического поглощения C=O-связи амидной группы белков и нуклеиновых кислот бактерий (волновое число – 1650 см$^{-1}$), “синий” сдвиг полосы на ≈ 200 см$^{-1}$, и последующий “красный” ангармонический сдвиг этой полосы на величину до 350-400 см$^{-1}$. Квантово-механический анализ колебаний близких по структуре молекул в рамках колебательной теории возмущений 2-го порядка показал, что положение полосы C=O-связи при “синем” сдвиге отвечает колебаниям в отсутствие водородных связей, а ее значительный “красный” сдвиг вызван ангармонизмом, который для первого колебательного кванта достигает 30 см$^{-1}$. На основании этих данных предложен молекулярный механизм сверхбыстрого разрушения вторичной структуры белков и нуклеиновых кислот бактерий P. aerugionosa под действием фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 6 мкм через мгновенный разрыв водородной связи на C=O моде при поглощении первого ИК-фотона и перманентную фиксацию разрыва через высокоуровневое колебательное возбуждение при пороговой интенсивности излучения.

DOI: 10.31857/S0370274X25080114, EDN: XDOECI

1. Инактивация патогенных бактерий в пищевой промышленности и медицине резонансным воздействием ИК-лазерного излучения [1–3] привлекает исследователей целым рядом очевидных преимуществ – направленностью, экономичностью и бесконтактностью (в том числе – сквозь ИК-прозрачную изолирующую полимерную пленку [3]) по сравнению с тепловыми источниками типа печей [4]. Используются спектральные диапазоны в области ≈ 3 мкм (деформационные C–H, N–H, O–H колебания [5]) и ≈ 6 мкм (деформационные C=O и N–H колебания в амидных группах белков и нуклеиновых кислот [5]), где в первом случае воздействие происходит практически на все связи в пределах всей бактерии, тогда как во втором случае поглощенная энергия изначально локализована в пределах амидной группы. Резонансное ИК-лазерное воздействие приводит к существенной инактивации (прекращению размножения) патогенных бактерий [1, 3], а при превышении определенной, довольно высокой пороговой интенсивности излучения (0.3 или 1 ТВт/см^2 в зависимости от длины волны) – к полной инактивации бактериальной культуры в пределах области облучения [2].

Молекулярные механизмы инактивации патогенных бактерий под действием резонансного ИК-лазерного излучения предполагают перестройку связанной с водородными связями вторичной и третичной структуры нуклеиновых кислот (ДНК и РНК – дезоксирибонуклеиновой и рибонуклеиновой кислот – как носителей генетической информации [6]), а также белков как структурных, метаболических и защитных агентов в организме бактерии [7].

1)e-mail: kudryashovsi@lebedev.ru; shelyginasn@lebedev.ru

Такие процессы перестройки, связанные с молекулярными колебаниями на временах порядка 1 пс, целесообразно исследовать методами сверхбыстрой спектроскопии [8, 9]. Предыдущие исследования во временной области (с временным разрешением) с использованием методов возбуждения и зондирования растворов аминокислот ультракороткими ИК-лазерными импульсами позволили наблюдать относительно медленную – пикосекундную временную динамику ослабления водородной связи и развертывание β-витка, но не позволили установить детальный механизм [8]. Исследования в спектральной области – в режиме пропускания ультракоротких ИК-лазерных импульсов с шириной лазерной полосы, включающей полосы характеристических колебаний биомолекул бактерий, и пиковой интенсивностью многократно ниже пороговой для инактивации бактерий тем не менее показали сильные пертурбации исходного ИК-спектра гармонических колебаний [10, 11]. В последнем случае наблюдались "синие" спектральные смещения полос [10], что на основании буквально единичной работы для воды можно сопоставить с разрывом водородных связей, уменьшающих частоту колебаний [9], тогда как "красные" спектральные смещения обычно возникают при высоких уровнях колебательного возбуждения вследствие ангармонизма. Однако детальный порядок молекулярных трансформаций вторичной и третичной структуры нуклеиновых кислот и белков, а также природа происходящей при этом пороговой по интенсивности резонансного ИК-лазерного излучения инактивации бактерий под действием до сих пор не установлены. Лежащий в основе процесса инактивации бактерий неизвестный молекулярный механизм может также иметь прямое отношение и проливать свет на природу разрабатываемых в последние годы биомедицинских технологий кератомии роговицы глаза под действием резонансного фемтосекундного ИК-лазерного излучения [12, 13], начальные исследования которых пока находятся на прикладном уровне.

В настоящей работе исследованы трансформации ИК-спектра образцов планктона бактерий P. aerugionosa на ИК-прозрачной кремниевой подложке в масштабе резонансно воздействующих фемтосекундных ИК-лазерных импульсов с длиной волны 6 мкм в зависимости от пиковой интенсивности излучения в диапазоне от низких значений вплоть до превышения порога неразрушающей инактивации бактерий этой культуры.

2. В проведенных исследованиях измерялись коэффициенты ИК-пропускания T n-легированных пластин кремния (толщина – 0.45 мм, легирующая примесь – фосфор, концентрация примеси – 10^{17} см$^{-3}$) – чистой пластины (контроль) и пластины с нанесенным планктоном бактерий изолята культуры синегнойной палочки (Pseudomonas aeruginosa, P. aerugionosa) из коллекции НИЦЭМ им. Н. Ф. Гамалеи, установленных перед щелью ИК-спектрометра (рис. 1). Бактерии высаживались на поверхность кремния в виде субмонослойного покрытия с известным стационарным спектром оптической плотности в ИК-диапазоне (за вычетом оптической плотности чистой кремниевой пластины, фурье-ИК спектрометр FT-805, SIMEX), где в области 1400–1900 см$^{-1}$ (рис. 2a) проявляются колебания C-N (≈ 1550 см$^{-1}$) и C=O (≈ 1650 см$^{-1}$) амидо-групп I,II [5].

Образцы облучались ИК-лазерными импульсами (центральная длина волны – 6.1–6.2 мкм, полуширина – 1 мкм, длительность – 140 фс) генератора разностной частоты nDFG (Light Conversion), накачиваемого излучением Ti:Sa лазера (Spitfire HP, Spectra-Physics, центральная длина волны ≈ 800 нм, длительность импульса ≈ 45 фс) после преобразования в параметрическом усилителе OPA TOPAS-C+ (Light Conversion) [10]. ИК-лазерные импульсы с максимальной энергией до 12.5 мкДж фокусировались на щель спектрометра Solar TII MS2004 (SOL Instruments) с широкополосным пироэлектрическим приемником ПБ-9М сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 150 мм в пятно с гауссовским 1/e-радиусом по интенсивности ≈ 250 мкм, параметры фокусировки изменялись перемещением зеркала в направлении образца (фокуса зеркала позади образца), в итоге пиковая интенсивность излучения I_0 варьировалась в диапазоне $3-5 \times 10^2$ ГВт/см^2, что на два порядка выше, чем в предыдущих спектральных исследованиях (5 ГВт/см^2 [10]), и превышает пороговую интенсивность инактивации бактерий P. aerugionosa на длине волны 6 мкм 3×10^2 ГВт/см^2 [2]. Облучение производили с частотой следования ИК-лазерных импульсов 1 кГц.

Для фрагментарно-схожих с ДНК и РНК в отношении амидной группы молекул N,N-диметилацетамида (ДМАА) в работе был также проведен расчет нормальных колебаний амидной группы и их ангармонизма в приближении колебательной теории возмущений 2-го порядка (VPT2). Расчеты были проведены с использованием квантово-химической программы Gaussian2009 [14]. Ввиду большого размера молекул был использован электронный метод функционала плотности (density functional theory – DFT: B3LYP), а в качестве

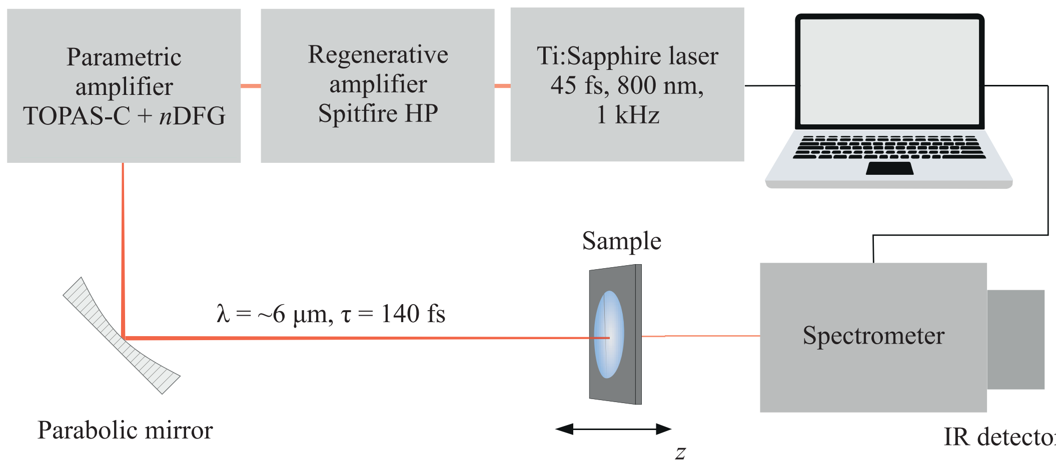

Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема спектральных измерений динамического ИК-пропускания бактерий

базисного был использован набор 6-31G+(d,p), доказавший свою эффективность в предсказании геометрических конфигураций и силового поля молекул [15], хотя, возможно, его эффективность обусловлена эффектами компенсации ошибок. Рассчитывались равновесные геометрические структуры, электронные энергии образования, типы нормальных мод в соответствии с доминантными вкладами координат локальной симметрии, гармонические частоты нормальных мод и их отнесение, набор ангармонических постоянных для оценки величины ангармоничности, ангармонические частоты и сдвиги относительно гармонических частот.

3. На рисунке 2a в диапазоне 1300–2000 см$^{-1}$ представлен стационарный ИК-спектр оптической плотности бактериального покрытия P. aerugionosa на кремниевой пластине после коррекции на пропускание чистой контрольной пластины. В данном спектре доминирует полоса в области 1650 см$^{-1}$ (амид I) – колебание полипептидного каркаса, которое возникает в основном (на 80 %) из-за валентного C=O колебания пептидных групп с незначительными вкладом, вызванными валентным колебанием C–N, деформационным C–C–N и плоскостным деформационным N–H. На частоту данного колебания практически не влияет природа боковых цепей, но существенно влияет вторичная структура, связанная с водородными связями, поэтому его параметры часто используются для анализа вторичной структуры. Различные элементы вторичной структуры белка – колебания амида I, связанные с α-спиралью ($\sim$1655 см$^{-1}$), β-складчатостью ($\sim$1637 см$^{-1}$) и дышащей модой нуклеиновых кислот ($\sim$1620 см$^{-1}$) – поглощают излучение в области 1600–1700 см$^{-1}$, однако их полосы обычно в значительной степени перекрываются и в спектре поглощения белков и нуклеиновых кислот наблюдается неразрешенная широкая полоса амида I, особенно если белки содержат различные элементы вторичной структуры. В сравнении с ним лежащая рядом ($\sim$ 1550 см$^{-1}$) полоса амида II представляет собой комбинацию деформационного колебания в плоскости N–H и валентного колебания C–N с небольшим вкладом деформационного колебания в плоскости C–O и валентных колебаний C–C, N–C. На частоту колебаний амида II колебания боковой цепи практически не влияют, а корреляция с вторичной структурой менее очевидна, чем для амида I [16].

В сравнении со стационарным спектром для бактерий P. aerugionosa спектр нормированного динамического пропускания $\ln(T/T_0)$ при минимальной величине $I_0 \approx 3$ ГВт/см^2 (рис. 2b) показывает: 1) заметное насыщение (“выгорание”) сильных, хорошо разрешенных полос поглощения (положительные значения) в полосах 1650 см$^{-1}$ (амид I) и 1550 см$^{-1}$ (амид II), совпадающих с пиковыми значениями спектральной яркости лазерного излучения (рис. 2a); 2) отсутствие изменений по сравнению с пропусканием необлученного образца T_0 (нулевые значения) в областях исходно слабого поглощения – 1350–1500 см$^{-1}$ и 1800–2000 см$^{-1}$, где спектральная яркость лазерного излучения также невелика; 3) отсутствие наведенного облучением поглощения (отрицательные значения) по всему спектру. Вид спектра нормированного пропускания $\ln(T/T_0)$ отражает тот факт, что в облучаемой области бактериального покрытия в масштабе фемтосекундного ИК-лазерного импульса в ансамбле амидных групп для части групп произошли переходы в основном электронном состоянии между колебательными уровнями $V = 0$ и $V = 1$ $(0 \to 1)$ на соответствующих гармонических

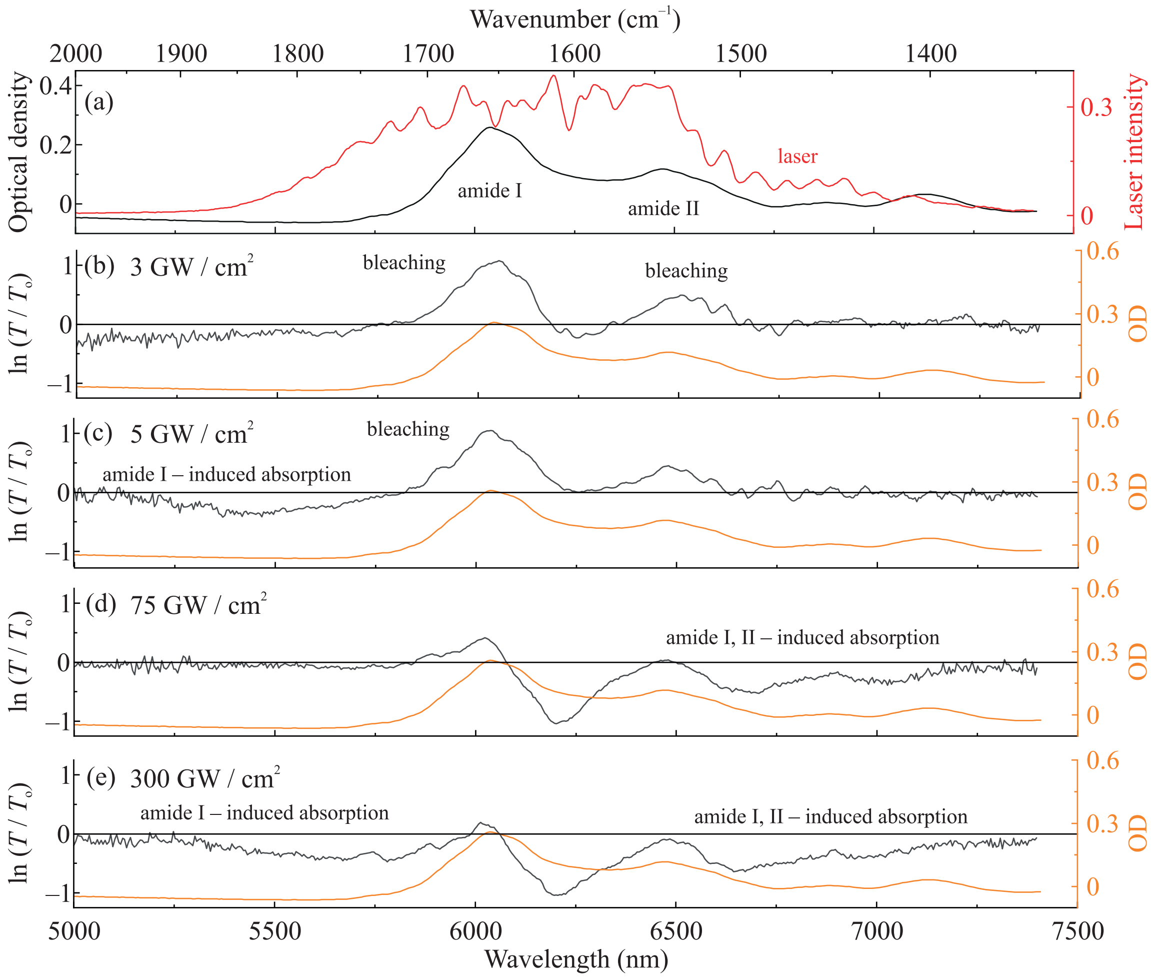

Рис. 2. (Цветной онлайн) (a) – Стационарный спектр оптической плотности бактериального покрытия P. aerugionosa в области колебаний амида I и амида II (левая ось), спектральная яркость фемтосекундного лазерного импульса (правая ось). (b)–(e) – Спектры нормированного динамического пропускания $\ln(T/T_0)$ при $I_0 = 3$ (b), 5 (c), 75 (d) и 3×10^2 (e) ГВт/см^2 (левая ось), для сравнения приведен спектр оптической плотности (OD) из *a* (правая ось)

частотах 1650 см$^{-1}$ (амид I) и 1550 см$^{-1}$ (амид II) с частичным насыщением данных переходов из-за существенного заселения уровня $V = 1$. Эффект является довольно тривиальным и хорошо известным в динамической спектроскопии поглощения [8–9, 17], а также качественно аналогично наблюдался при соответствующих условиях в нашей предшествующей работе [10].

Вместе с тем при более высокой величине $I_0 \approx \approx 5$ ГВт/см^2 спектр нормированного динамического пропускания $\ln(T/T_0)$ (рис. 2b) демонстрирует, наряду с полосами частичного насыщения поглощения колебаний амида I и амида II, дополнительно появление заметного локального минимума в области 1800–1850 см$^{-1}$, который отвечает *наведенному* поглощению в бактериях. Похожие спектральные трансформации наблюдались в наших предшествующих исследованиях данной бактерии, ограничившихся этой величиной I_0 [10], а также для сложных биомолекул с амидными группами [8]. Согласно справочным данным по ИК-спектрам органических соединений с амидными группами, уже даже разбавление растворов аминокислот смещает частоты гармонических колебаний амидных групп в "синюю" область на 30–60 см$^{-1}$ – для амида I до 1755 см$^{-1}$ [18], тогда как полное отсутствие водородных связей может дополнительно усилить смещение, как это ожидается в ИК-спектрах газофазных молекул [9]. В частности, в проведенных в настоящей работе квантово-механических расчетах для фрагментарно-схожих с ДНК и РНК молекул N,N-диметлиацетамида частоты гармонических колебаний амидов I,II для молекулы в газовой фазе (вакууме) в отсутствие водородных связей лежат на

$1724\,\text{см}^{-1}$ (вместо $1650\,\text{см}^{-1}$) и $1545\,\text{см}^{-1}$ (вместо $1550\,\text{см}^{-1}$), т.е., действительно, как указывалось выше, ожидается сильный эффект водородной связи для амида I и отсутствие эффекта для амида II. Предполагается, что эффект такого наведенного поглощения с "синим" спектральным сдвигом полосы амида I является динамическим – возникает, как видно из насыщения полосы амида I, в определенный момент фемтосекундного лазерного импульса в результате раскачки сильного C=O-колебания (период колебания – 20 фс для частоты колебания $1650\,\text{см}^{-1}$) с полной энергией ≈ 0.2 эВ для уровня $\text{V} = 1$, поскольку межмодовый перенос на временах порядка 100 фс можно еще считать незначительным [19]. В итоге, такое уже ангармоническое для уровня $\text{V} = 1$ C=O-колебание может в реальном времени (например, в воде – на временах порядка 50 фс [17]) детерминированно разорвать слабую водородную связь (типичная энергия – менее 0.1 эВ [20]) так, что в регистрируемых интегральных по длительности лазерного импульса спектрах последовательно проявятся как признаки насыщения поглощения на гармонической частоте переходов $0 \rightarrow 1$ колебаний амидов I,II (положительные значения $\ln(T/T_0)$ на рис. 2b c), так и последующего наведенного поглощения для этого колебания на переходе $1 \rightarrow 2$ и выше (минимум $\ln(T/T_0)$ на рис. 2c). Наведенное поглощение происходит на смягченной ангармонической частоте C=O-колебаний (согласно данным квантово-механических расчетов для ДМАА – "красное" смещение порядка $30\,\text{см}^{-1}$ для $\text{V} = 1$ и более для более высоких колебательных уровней $\text{V} > 1$), с учетом ангармонизма тем не менее сильно – порядка $200–230\,\text{см}^{-1}$ – смещенной в "синюю" область из-за разрыва водородных связей. Известная из литературы величина "синего" спектрального смещения для воды из-за разрыва водородных связей – порядка $300\,\text{см}^{-1}$ [9] – согласуется с оценкой "синего" смещения для бактерий P. aerugionosa.

При дальнейшем увеличении I_0 до $75\,\text{ГВт/см}^2$ в спектре $\ln(T/T_0)$ ослабляются ("замываются" по длительности импульса) эффекты насыщения поглощения амидов I,II на гармонических частотах и наведения поглощения амида I с "синим" смещением (область $\sim 1800\,\text{см}^{-1}$), но добавляется сильное наведенное поглощение с "красным" смещением в области $1400–1600\,\text{см}^{-1}$ (рис. 2d). Оцениваемое "красное" ангармоническое смещение частоты амида I из области $1800\,\text{см}^{-1}$ в область, как минимум, $1600\,\text{см}^{-1}$ (минимум $\ln(T/T_0)$ на рис. 2d) – на величину порядка $200\,\text{см}^{-1}$ – можно оценочно сопоставить поглощению модой амида I 4–6 ИК-фотонов (≈ 1 эВ). В результате термализации этой энергии, поглощенной амидной группой, в рамках типичного структурного фрагмента (-CR_1R_2-CO-NH-, где R_1R_2 – углеводородные радикалы или водород H) белков, ДНК и РНК с числом атомов $N > 7$ энергия, приходящаяся на один атом, составляет до 0.14 эВ, т.е. кратно превышает энергию водородной связи, формирующей вторичную и третичную структуру белков, ДНК и РНК. В результате, с ростом I_0 – в частности, в области порога инактивации бактерий P. aerugionosa $\approx 3 \times 10^2\,\text{ГВт/см}^2$ [2] – поглощенная структурным фрагментом энергия возрастает по мере возбуждения более высоких колебательных уровней амидов I,II (рис. 2e), делая при вложении определенной пороговой плотности энергии на атом фрагмента денатурацию вторичной и третичной структуры необратимой в отношении нарушения функции передачи наследственной информации. Для непосредственного, более надежного и информативного наблюдения эффекта планируются комплементарные структурные исследования методами электронной микроскопии [21], динамической спектроскопии комбинационного рассеяния и фотолюминесценции [22, 23], а также нелинейной оптики [24].

Интересно, что наиболее интенсивная часть спектра ИК-лазерных импульсов ограничена областью $> 1500\,\text{см}^{-1}$ (рис. 2a), и поэтому для возбуждения высоких колебательных уровней амидов I,II с частотой ангармонических колебаний ниже этой величины потребуется увеличение величины I_0 – для включения многофотонного нерезонансного поглощения фотонов из пика лазерной полосы на рис. 2a или просто существенного подъема интенсивности "красного" крыла спектра ИК-лазерных импульсов для возбуждения резонансных переходов между высокими колебательными уровнями амидов. Очевидно, что какой-то из этих двух – нерезонансных многофотонных или резонансных однофотонных – процессов в результате будет определять пороговую величину интенсивности лазерного излучения для инактивации бактерий P. aerugionosa, однако, выявление доминирующего механизма требует дальнейших исследований.

4. В заключение, в данной работе впервые исследованы трансформации ИК-спектра бактерий P. aerugionosa в области колебаний амидной группы (амидов I,II) под действием фемтосекундных лазерных импульсов с центральной длиной волны около 6 мкм и варьируемой пиковой интенсивностью вплоть до превышения порога $\approx 3 \times 10^2\,\text{ГВт/см}^2$ для неразрушающей инактивации данных бактерий. По мере роста интенсивности лазерного излучения для колебаний амидов I и II, помимо известного эффекта насыщения однофотонного ИК-поглощения с нижнего колебательного уровня, отмечен новый для бактерий и слабоизученный для молекул эффект большого “синего” спектрального смещения полос ИК-поглощения колебаний атомов, участвующих в формировании вторичной и третичной структуры сложных биомолекул за счет множественных слабых водородных связей, из-за разрыва последних. Для бактерий эффект “синего” смещения проявился для чувствительного к вторичной и третичной структуре колебания амида I уже при однофотонном ИК-возбуждении с большой энергией первого колебательного уровня (0.2 эВ), кратно превышающего типичные энергии водородных связей (<0.1 эВ). При дальнейшем росте интенсивности лазерного излучения отмечается “красное” смещение колебаний амидной группы из-за ангармонизма возбуждения высоких колебательных уровней амидов, с тем, что пороговая вложенная энергия амидной группы после ее термализации обеспечивает денатурацию вторичной и третичной структуры нуклеиновых кислот бактерий, необратимую в отношении нарушения функции передачи наследственной информации.

Предложенный молекулярный механизм инактивации бактерий качественно объясняет микроскопический механизм резонансного взаимодействия интенсивных фемтосекундных ИК-лазерных импульсов с колебаниями амидной группы белков и нуклеиновых кислот бактерий, в том числе – амида I, связанного с их вторичной и третичной структурой, но нуждается в дальнейшей детализации, в том числе – другими независимыми динамическими структурными методами.

Финансирование работы. Подготовка образцов, участие в экспериментах и анализ результатов выполнены С. И. Кудряшовым, С. Н. Шелыгиной и Э. Р. Толордава в рамках государственного задания Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук (регистрационный номер FFMR-2024-0009). Спектральные исследования проведены В. О. Компанцом и С. В. Чекалиным в рамках государственного задания Института спектроскопии Российской академии наук (регистрационный номер FFUU-2025-0006). Квантово-механические расчеты выполнены А. В. Столяровым и И. М. Ефимовым в рамках государственного задания Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (регистрационный номер 121031300173-2).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. T. Toyama, J. Fujioka, K. Watanabe, A. Yoshida, T. Sakuma, K. Inaba, T. Imai, T. Nakajima, K. Tsukiyama, N. Hamada, and F. Yoshino, Sci. Rep. **12**(1), 18111 (2022).
2. V. Kompanets, S. Shelygina, E. Tolordava, S. Kudryashov, I. Saraeva, A. Rupasov, O. Baitsaeva, R. Khmelnitskii, A. Ionin, Yu. Yushina, S. Chekalin, and M. Kovalev, Biomed. Opt. Express **12**(10), 6317 (2021).
3. С. Н. Шелыгина, И. Н. Сараева, Э. Р. Толордава, А. А. Настулявичус, and С. И. Кудряшов, Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева Российской Академии Наук **50**(10), 29 (2023).
4. A. A.Oduola, R. Bowie, S. A. Wilson, Z. Mohammadi-Shad, and G. G. Atungulu, Journal of Food Safety **40**(2), e12764 (2020).
5. J. P. Maity, S. Kar, C. M. Lin, C. Y. Chen, Y. F. Chang, J. S. Jean, and T. R. Kulp, Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy **116**, 478 (2013).
6. R. R. Breaker and G. F. Joyce, Chemistry & Biology **21**(9), 1059 (2014).
7. N. F. Goodacre, D. L. Gerloff, and P. Uetz, MBio **5**(1), 10 (2014).
8. C. Kolano, J. Helbing, M. Kozinski, W. Sander, and P. Hamm, Nature **444**(7118), 469 (2006).
9. R. Laenen, C. Rauscher, and A. Laubereau, The Journal of Physical Chemistry A **101**(18), 3201 (1997).
10. В. О.Компанец, С. И. Кудряшов, Э. Р. Толордава, С. Н. Шелыгина, В. В. Соколова, И. Н. Сараева, М. С. Ковалев, А. А. Ионин, С. В. Чекалин, Письма в ЖЭТФ **113**(6), 365 (2021).
11. S. Shelygina, V. Kompanets, E. Tolordava, S. Gonchukov, S. Chekalin, and S. Kudryashov, Laser Phys. Lett. **19**(1), 015602 (2021).
12. K. Tian, M. Xiang, X. Wen et al. (Collaboration), Laser & Photonics Rev. **18**(2), 2300421 (2024).
13. J. Guo, P. Chen, M. Xiang, K. Tian, Z. Wan, L. He, W. Li, X. Peng, Yu. Peng, X. Wen, L .Liu, Q. J. Wang, Y. Leng, and H. Liang, Communications Medicine **5**(1), 1 (2025).
14. V. Barone, J. Bloino, and M. Biczysko, Vibrationally-resolved electronic spectra in GAUSSIAN 09. Revision a **2**(1) (2009).
15. P. J.Singh, A. K. Das, K. K. Gorai, A. Shastri, D. V. Udupa, and B. N. Rajasekhar, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer **280**, 108092 (2022).
16. A. Barth, Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics **1767**(9), 1073 (2007).
17. В. С. Летохов, В. П. Чеботаев, Успехи физических наук **113**(7), 385 (1974).
18. Л. Беллами, *Новые данные по ИК-спектрам сложных молекул*, Мир, М. (1971).

19. M. L. Cowan, B. D. Bruner, N. Huse, J. R. Dwyer, B. Chugh, E. T. J. Nibbering, T. Elsaesser, R. J. D. Miller, Nature **434**(7030), 199 (2005).
20. И. П. Макарова, Физика твердого тела **57**(3), 432 (2015).
21. А. А. Мельникова, Р. А. Камышинский, А. В. Комова, А. П. Руденко, З. Б. Намсараев, Известия Российской академии наук. Серия физическая **85**(8), 1070 (2021).
22. Н. П. Ковалец, И. В. Разумовская, С. А. Бедин, А. В. Наумов, Письма в ЖЭТФ **118**(4), 245 (2023).
23. И. Ю. Еремчев, Д. В. Прокопова, Н. Н. Лосевский, И. Т. Мынжасаров, С. П. Котова, А. В. Наумов, Успехи физических наук **192**(6), 663 (2022).
24. М. Ю. Еремчев, А. В. Наумов, Письма в ЖЭТФ **121**(3), 240 (2025).