

## Спектрофотометрическое определение форм присутствия йода в растворах соединений йода

© Н.Л. Алукер<sup>1</sup>, М. Herrmann<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кемеровский государственный университет,  
650000 Кемерово, Россия,  
e-mail: naluker@gmail.com

<sup>2</sup> Department of Meteorology and Atmospheric Science, The Pennsylvania State University,  
16802 PA, USA

e-mail: maria.herrmann@psu.edu

Поступила в редакцию 15.12.2020 г.

В окончательной редакции 29.01.2021 г.

Принята к публикации 05.02.2021 г.

Исследуются оптические характеристики растворов кристаллического йода и йодных соединений, определяются формы присутствия йода и некоторых сопутствующих соединений в растворах. Оценивается возможность применения прямых спектрофотометрических методов для определения различных форм нахождения йода и сопутствующих соединений в воде.

**Ключевые слова:** спектр поглощения, вода, йодид ион, йодат ион, трийодид ион, нитрат ион.

DOI: 10.21883/OS.2021.05.50895.303-20

### Введение

В природном йоде наряду с стабильным изотопом <sup>127</sup>I присутствует долгоживущий <sup>129</sup>I с большим периодом полураспада (~ 10<sup>7</sup> лет). При его распаде испускается бета-излучение с энергией ~ 150 keV и гамма-излучение с энергией ~ 40 keV. В связи с большим периодом полураспада содержание <sup>129</sup>I нарабатывается в окружающей среде [1]. Короткоживущие изотопы йода (<sup>131</sup>I, <sup>123</sup>I, <sup>124</sup>I, <sup>125</sup>I) широко применяются в медицине, поэтому задача их детектирования важна [2]. Концентрация <sup>129</sup>I за счет деятельности предприятий ядерного комплекса может изменить существующее соотношение между стабильным и радиоактивным йодом в атмосфере, поэтому методы детектирования йода в объектах окружающей среды приобретают все большее значение. Трудность регистрации йода заключается в том, что он может присутствовать в соединениях, проявляя разные валентности (степени окисления). Это широко используется в аналитических йодометрических методиках определения ряда веществ [3].

При соединении с щелочными металлами йод образует соли, проявляя в этих устойчивых соединениях валентность –1. Щелочные йодиды в кристаллическом состоянии являются модельными ионными системами и хорошо изучены. Ширина запрещенной зоны кристалла KI составляет 6.3 eV [4]. Самый низкоэнергетический пик фундаментального поглощения 5.8 eV связывают с созданием экситона [4]. В щелочных йодидеах осуществляется локализация образующейся при облучении зоной дырки на двух ионах галогена, т.е. автолокализация дырки с образованием V<sub>k</sub>-центра в виде I<sub>2</sub><sup>-</sup> [4–5]. Йодиды металлов, например CuI, HgI<sub>2</sub>, характеризуются сильной

ионной связью, являются широкозонными полупроводниками с шириной зоны 3.1 и 2.13 eV соответственно [6]. Они применяются в качестве полупроводниковых детекторов излучений, не требующих охлаждения при их использовании.

Кристаллический йод в свободном виде в природе не встречается, так как он очень легко переходит в газообразное состояние.

В атмосфере йод присутствует как CH<sub>3</sub>I, HIO<sub>3</sub>, ICN, I(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> и др. Основным процессом при фотовозбуждении молекулы свободного йода является диссоциация (прямой фотолиз, осуществляющийся при воздействии света с λ < 499 nm) [7]. Основным резервуаром потребления атмосферного йода служит океан, но накапливается он в морских водорослях и почти полностью исчезает из морской воды, испаряясь под действием света. Из океана соединения йода снова попадают в атмосферу, поэтому йод обладает очень высокой миграционной способностью.

В воде йод частично гидрализуется в присутствии свободных ионов H<sup>+</sup> и OH<sup>-</sup>: I<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O = HI + HIO, однако растворимость I<sub>2</sub> в воде невелика и зависит от общей минерализации вод. Лучше он растворяется в спирте, сероуглероде и органических растворителях, а также в водных растворах йодидов, поэтому он может присутствовать в водах нефтяных и газовых месторождений в концентрациях, превышающих его ПДК в питьевой воде. В России именно подземные буровые воды являются основным источником получения йода. В природных водах йод может содержаться в виде ряда соединений. Это йодаты (NaIO<sub>3</sub>), йодиды (KI), гипойодиды (KIO) йодноватая (HIO<sub>3</sub>) и йодноватистая (HIO) кислоты, йодистый метил (CH<sub>3</sub>I), трийодметан (CHI<sub>3</sub>) и др. [8].

Йодиды щелочных металлов при больших концентрациях в растворах склонны образовывать полийодиды ( $KI_3$ ). С кислородсодержащими растворителями йод образует соединения (выступая в качестве катиона с переменной валентностью) со слабыми донорно-акцепторными связями. Катион  $I^+$  в свободном состоянии является нестабильным [8,9], поэтому он в результате цепочки последовательных окислений окисляется до степени окисления +5, в которой он присутствует в окружающей среде. Соединения семивалентного йода имеют меньшее значение.

Сорбированный на твердых носителях (например, кварце) йод образует комплексы с переносом заряда, что усиливает его связь с поверхностью [10].

ПДК йода в воде  $125 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ , среднее содержания йода в природных водах  $\sim 10 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ . Средние содержания йода в морской воде в виде йодидов  $20\text{--}30 \mu\text{g}$  на килограмм морской воды. При больших концентрациях йод является ядом, смертельная доза составляет  $2\text{--}3 \text{ g}$ .

С другой стороны, недостаток йода, являющегося структурным элементом синтеза гормонов щитовидной железы тироксина и трийодтиронина, приводит к развитию заболеваний щитовидной железы, т.е. поступление йода в организм в небольших концентрациях является необходимым [11].

В качестве метода детектирования низких содержания йода в жидких средах рассматриваются оптические методы (люминесценция при лазерном возбуждении, спектрофотометрия) [12–17].

Однако, несмотря на многочисленность исследований, сохраняются вопросы при анализе спектров поглощения йода.

## Экспериментальная часть

### Аппаратура и методика измерения

Спектры поглощения измерялись с использованием спектрофотометра SHIMADZU UV-1700 и регистрировались с использованием кювет разных толщин: 20, 10, 2, 1 mm.

Для исследований готовились растворы соединений йодидов и йодатов калия и лития, оксида йода и молекулярного йода в дистиллированной воде, природной нитрат-содержащей воде, ацетонитриле, спирте, этиленгликоле и гексане, а также паров йода, высаженных на кварцевое стекло. В качестве холостых (фоновых) проб использовались чистые растворители. Из спектров поглощения изучаемого соединения вычитался спектр поглощения растворителя. Измеренные спектры строились в координатах оптическая плотность ( $\log(I_0/I)$ ) при толщине поглощающего слоя 1 cm ( $\alpha$ ,  $\text{cm}^{-1}$ ) — длина волны (nm).

### Результаты исследования спектров поглощения водных растворов разных соединений йода

В спектре поглощения растворов в воде йодидов щелочных металлов регистрируются две полосы поглощения: 6.39 (194 nm) и 5.49 eV (226 nm) (рис. 1).

Обе эти полосы поглощения  $I^-$ , имеют близкие коэффициенты молярной экстинкции: 14200 и 13400  $\text{l}/\text{mol}\cdot\text{cm}$  [15]. Сильное поглощение позволяет обнаруживать ион  $I^-$  в воде при концентрациях  $\sim 30 \mu\text{g}/\text{l}$ , т.е. ниже уровня ПДК. В достаточно широком диапазоне изменения концентрации раствора наблюдается линейная зависимость оптической плотности от концентрации (рис. 1, b). При больших концентрациях KI в воде в спектре поглощения наблюдается слабая полоса поглощения с максимумом  $\sim 350 \text{ nm}$  и неявно выраженное поглощение в области  $\sim 290 \text{ nm}$ , что свидетельствует о появлении в растворе  $I_3^-$ .

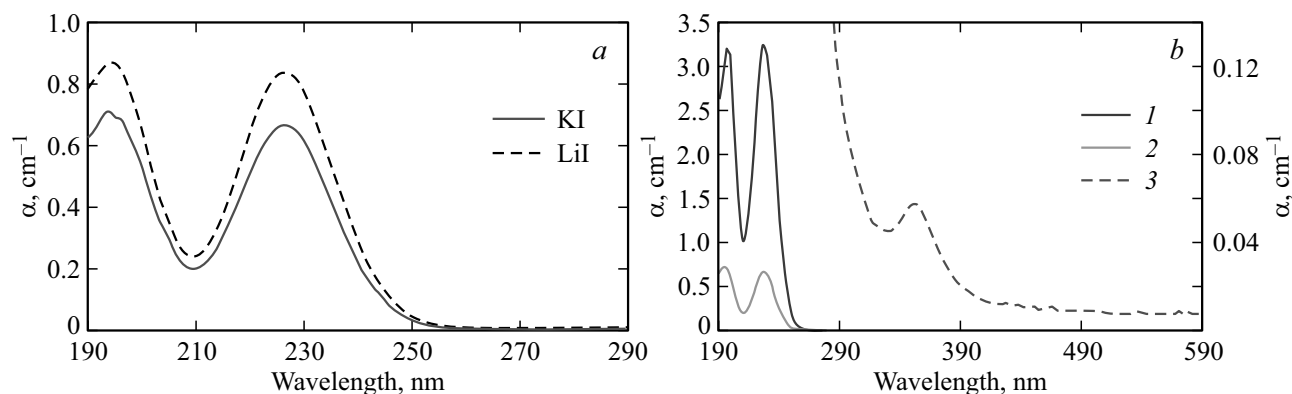
Однако из-за возможного присутствия в измеряемых водах нитратов, нитритов, фенолов и других соединений, поглощающих в области спектра 185–235 nm, обнаружение йода при низких концентрациях становится проблематичным. Так, в нитрат-содержащих природных водах (даже на уровне  $\sim 1 \text{ mg}/\text{l}$ ) на фоне сильного поглощения нитрат-иона с максимумом 202 nm и большой шириной полосы поглощения йода на уровне ПДК  $125 \mu\text{g}/\text{l}$  обнаружение йода будет невозможно [18]. Фенолы в природных водах не присутствуют в концентрациях, оказывающих влияние на спектр поглощения  $I^-$  [19].

В сильно разбавленных водных растворах йодидов могут присутствовать соединения пятивалентного йода. Йодаты, к сожалению, не имеют характерных полос поглощения в УФ области спектра (рис. 2, a), однако наложение их УФ поглощения на поглощение иона  $I^-$  приводит к изменению соотношения полос 194 и 226 nm (рис. 2, b).

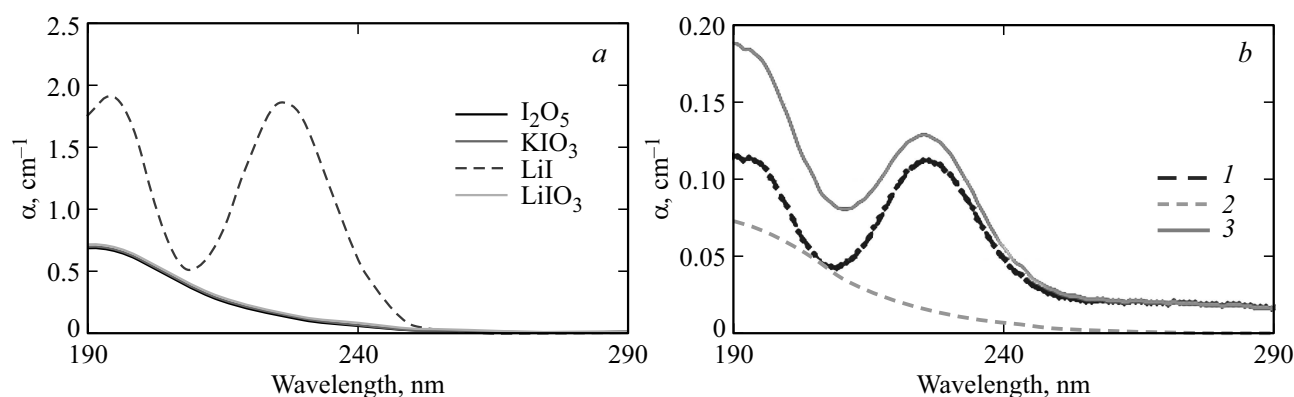
При растворении кристаллического йода в спектрах поглощения присутствуют полосы с максимумами поглощения  $I^-$  (194, 226 nm),  $IO_3^-$  ( $\leq 190 \text{ nm}$ ),  $I_3^-$  (287–290 nm, 350–354 nm) и поглощение комплекса  $[I_2-H_2O]$  ( $\sim 460 \text{ nm}$ ) [12–17]. Кроме этих полос в спектре (по разности) обнаруживается поглощение с максимумом  $\sim 202 \text{ nm}$ , приписываемое поглощению  $I_2$  [12–17].

Полосы поглощения с максимумами 287 и 353 nm приписывают появлению в растворе трийодид-ионов  $I_3^-$  [12–17]. Спиртовая настойка йода и растворы йода в органических растворителях содержат значительные количества трийодида:  $I_2 + I^- \rightleftharpoons I_3^-$ . В воде эффективность образования  $I_3^-$  низкая, однако в силу высокого коэффициента молярной экстинкции он достаточно хорошо регистрируется в водном растворе йода. Растворение  $I_2$  в водном растворе с наличием йодидов щелочных металлов существенно повышает растворимость йода в воде и других полярных растворителях.

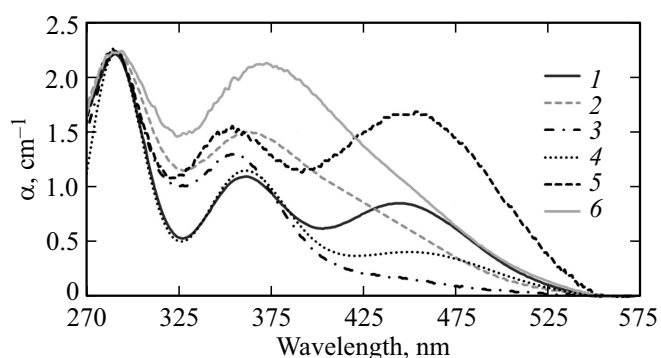
Спектры поглощения молекулярного йода в разных растворителях и паров йода, высаженных на кварцевое



**Рис. 1.** (а) Спектры поглощения щелочных иодидов в воде. (б) Спектры поглощения KI в воде: 6 mg/l (кривая 1), 30 mg/l (2), насыщенный раствор (3) (правая ось ординат).



**Рис. 2.** (а) Спектры поглощения водных растворов соединений пятивалентного йода и LiI. (б) Влияние поглощения пятивалентного йода на перераспределение интенсивностей полос поглощения  $I^-$ :  $I^-$  (кривая 1),  $IO_3^-$  (2), наблюдаемый спектр поглощения (3).



**Рис. 3.** Спектры поглощения растворов  $I_2$  в разных растворителях и  $I_2$  на кварцевом стекле, нормированные на поглощение  $I_3^-$  (290 nm): кривая 1 — ацетонитрил, 2 — спирт, 3 — вода, 4 — гексан, 5 — йод на кварцевом стекле, 6 — йод на кварцевом стекле.

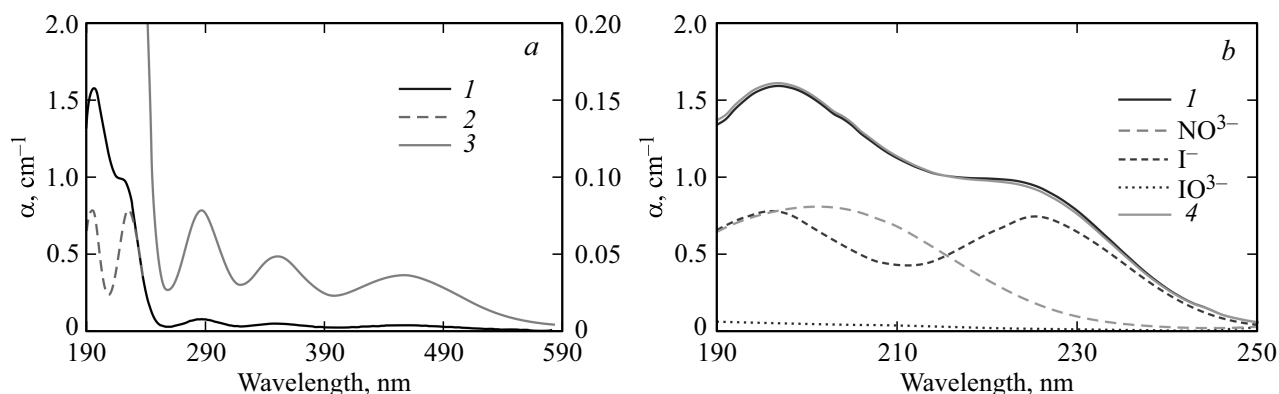
стекло, нормированные на поглощение  $I_3^-$  (290 nm), приведены на рис. 3. Концентрации вносимого в растворы йода на рис. 3 разные, так как в органических растворителях образование  $I_3^-$  гораздо эффективнее, чем

в водном растворе. Однако видно, что спектральные характеристики  $I_3^-$  в разных растворителях почти не претерпевают изменений (290 nm,  $\pi \leftrightarrow \pi$ ; 350 nm,  $n \leftrightarrow \sigma$ ), поглощение в области 440–460 nm, связываемое с поглощением комплекса (молекулярный йод-растворитель) довольно сильно меняется в зависимости от используемого растворителя,  $n \leftrightarrow \pi$ .

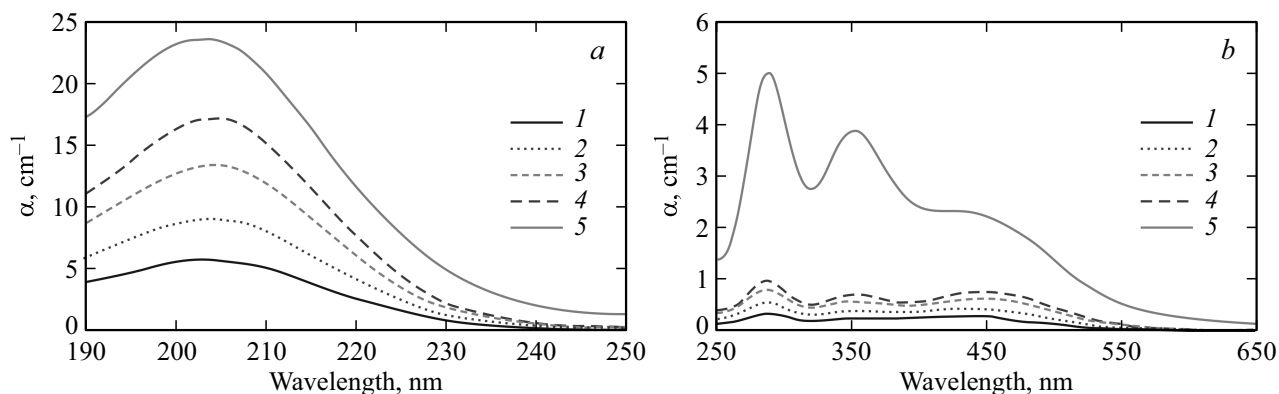
Даже незначительное поглощение в этой области свидетельствует о большом количестве связанного йода в силу низкого коэффициента молярной экстинкции комплекса.

Следовательно, для определения концентрации йода в растворе (и при низких, и при высоких его концентрациях в растворе) необходимо осуществлять детектирование четырех различных форм йода:  $I^-$ ,  $I_3^-$ ,  $IO_3^-$  и комплекса  $I_2$ -растворитель [12–17].

Спектр поглощения, полученный при растворении в дистиллированной воде паров йода, сорбированных на кварцевом стекле, т.е. перекристаллизованного (очищенного) молекулярного йода, приведен на рис. 4. В спектре поглощения выявляется поглощение  $I_2$  (460 nm),  $I^-$  (194 и 226 nm),  $I_3^-$  (290 и 350 nm) и неявно выраженное поглощение  $IO_3^-$  (~190 nm). По



**Рис. 4.** (а) Спектр поглощения высаженного на кварцевом стекле  $I_2$ , растворенного в дистиллированной воде: 1 — измеренный спектр, 2 — выделенное поглощение  $I^-$  (после вычитания поглощения  $IO_3^-$  и  $NO_3^-$ ), 3 — измеренный спектр (1) в увеличенном масштабе (правая шкала). (b) УФ часть того же спектра: 1 — измеренный спектр, 2 — эталонный спектр  $NO_3^-$ , 3 — эталонный спектр  $I^-$ , 4 — спектр, восстановленный суммированием поглощения эталонных растворов  $I^-$ ,  $IO_3^-$  и  $NO_3^-$  в дистиллированной воде.



**Рис. 5.** (а) Спектр свежего насыщенного раствора  $I_2$  в дистиллированной воде, измеренный через определенное время после приготовления: 1 — 10 min, 2 — 15 min, 3 — 23 min, 4 — 30 min, 5 — 10000 min. (b) Спектр свежего насыщенного раствора  $I_2$  в дистиллированной воде, измеренный через определенное время после приготовления: 1 — 10 min, 2 — 15 min, 3 — 23 min, 4 — 30 min, 5 — 10000 min.

разности спектров в УФ области кроме него выявляется поглощение в области 202 nm.

Оценим концентрацию разных форм йода в растворе (рис. 4).

На основе коэффициентов молярной экстинкции полос 287 и 350 nm ( $36000$  и  $20000$  l/(mol cm)) можно оценить содержание  $I_3^-$  в  $0.80 \pm 0.05$  mg/l. Содержание  $I^-$  на основе коэффициентов молярной экстинкции полос 194 и 226 nm ( $14200$  и  $13400$  l/(mol cm)) можно оценить в  $7.0 \pm 0.5$  mg/l. Содержание  $IO_3^-$  по поглощению  $\sim 190$  nm — в  $2.0 \pm 0.5$  mg/l. Концентрацию нитрат-иона — в  $5.0 \pm 0.2$  mg/l. Концентрация йода в комплексе с растворителем по поглощению 450 nm — в  $4.0 \pm 0.05$  mg/l.

При наблюдении в спектре всех полос поглощения большее количество йода будет сосредоточено в его комплексе с водой в виде иона  $I^-$ , меньшее — в виде  $I_3^-$  и в соединении с кислородом — в виде  $IO_3^-$ .

Спектры поглощения насыщенного раствора кристаллического йода сразу после приготовления и спустя определенные промежутки времени после растворения показывают изменение концентраций соединений йода в растворе при его медленном растворении (рис. 5).

В УФ части спектра (рис. 5, а) выделяется полоса поглощения в области 202 nm, приписываемая практически во всех литературных источниках поглощению  $I_2$  [12–17]. На наш взгляд, она обусловлена поглощением нитрат-иона [18]. В связи с тем, что это поглощение растет при растворении йода и насыщается через некоторое время после начала растворения йода, можно предположить, что на поверхности кристалликов йода присутствуют нитраты. Сорбция диоксида азота в присутствии влаги может приводить к образованию соединения йода с азотом ( $I(NO_3)$  или  $I(NO_3)_3$ ), в котором йод имеет валентность +1 и +3 соответственно.

Щелочные металлы могут присутствовать на поверхности зерен кристаллического йода, образуя нитраты

щелочных металлов ( $\text{MeNO}_3$ ), растворимость которых в воде высокая.

Нарушение линейности роста поглощения в УФ-полосе 202 нм (насыщение) происходит через  $\sim 40$  мин после начала растворения, а полосы поглощения  $\text{I}_3^-$  и 460 нм продолжают линейно расти в течение более длительного времени. Содержание нитрата в выдержанном насыщенном растворе молекулярного иона велико, и на его фоне поглощение  $\text{I}^-$  зафиксировать не удастся, хотя надежно фиксируются полосы поглощения  $\text{I}_3^-$  и комплекса йода с растворителем.

Поглощение в области 280–360 нм, где наблюдается поглощение  $\text{I}_3^-$  в воде, характерно для небольшого числа соединений. Из хорошо растворимых примесей это те же нитраты и нитриты, однако коэффициенты молярной экстинкции длинноволновых полос их поглощения малы, и они могут вносить вклад в поглощение растворов только при таких больших концентрациях, которые в природной воде практически не встречаются. Поэтому появление в спектре  $\text{I}_3^-$  уже само по себе является сигналом к тому, что в растворе высокое содержание йода, так как в эту форму переходит при растворении в воде небольшая в процентном отношении часть йода.

Для получения насыщенного раствора в воду добавлялось не менее 3 г йода. Концентрация  $\text{NO}_3^-$  при насыщении сигнала 150 мг/л. Получается, что  $\sim 5\%$  йода, вносимого в раствор, обогащено  $\text{NO}_3^-$ , т.е. толщина поверхностного слоя, находящегося под воздействием азота, может составлять  $\sim 50$  мкм при размере кристалликов йода  $\sim 1$  мм.

Оценим концентрации разных форм йода в насыщенном растворе после его длительной выдержки:  $\sim 50 \pm 5$  мг/л  $\text{I}_3^-$ ,  $\sim 200$  мг/л комплекса,  $\sim 150$  мг/л нитрат-иона, не более 50 мг/л  $\text{I}^-$ .

Таким образом, в насыщенном растворе и выдержанном в течение длительного времени растворе  $\text{I}_2$  в воде наибольшее количество йода будет сосредоточено в его комплексе с водой, а оставшийся йод находится в виде ионов  $\text{I}_3^-$  и  $\text{I}^-$ , с преимуществом трийодид-иона. Кроме йода в растворе присутствуют нитрат-ионы.

## Обсуждение

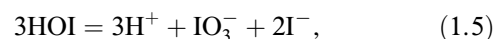
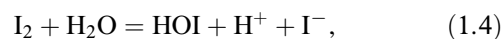
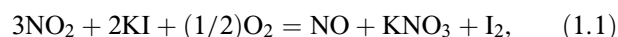
Откуда же в растворе йода может появиться нитрат-ион?

При воздействии на щелочно-галоидные кристаллы (ЩГК) радиационного и УФ-облучения (в контакте с атмосферным воздухом) установленным является факт окисления поверхности кристалла. С ростом удельной поверхности глубина окисления увеличивается. Реакция идет через последовательное образование промежуточных продуктов при окислении  $\text{I}^-$  до  $\text{I}^{5+}$  [20,21]. В спектрах поглощения кристаллов KI в твердой фазе и в насыщенных растворах KI наблюдается оптическое поглощение, характерное для  $\text{I}_3^-$  [5]. Появление  $\text{IO}_3^-$

и  $\text{I}_3^-$  на поверхности ЩГК обусловлено водой, всегда присутствующей на поверхности скола кристалла. Электронно-микроскопические исследования поверхности ЩГК, облученных рентгеновским и УФ-излучением, демонстрируют также и то, что на их поверхности происходит образование кристаллических фаз размерами  $\sim 300$  нм (причем при УФ-воздействии даже более эффективно) [5]. Анализ образовавшихся кристаллитов показывает, что это нитраты и нитриты калия и  $\text{KIO}_3$ . В ИК-спектрах проявляются молекулярные колебания диоксида и тетраоксида азота и анионов  $\text{NO}_3^-$ . При локализации на поверхности молекулярных форм азота в водных растворах неизбежно образование нитрата и нитрита:



$\text{NO}^+$  может обеспечивать вскрытие поверхности кристалла, обеспечивая условия для стабилизации  $\text{KNO}_3$ , а  $\text{NO}_3^-$  связываться поверхностью. В итоге имеем



Эти реакции объясняют, почему в растворах с KI растворение йода идет проще и появляется поглощение, связанное с  $\text{I}^-$ ,  $\text{I}_3^-$  и  $\text{IO}_3^-$ . Диоксид азота в присутствии кислорода воздуха реагирует с йодидом калия, вызывая образование трийодида. Понятно, что для кристаллического  $\text{I}_2$  в присутствии диоксида азота и щелочного металла реакция растворения йода идет эффективнее, что и подтверждается экспериментально. Без наличия йодида калия или сорбированного  $\text{NO}_2$ , т.е. анионов  $\text{I}^-$  и  $\text{NO}_3^-$ , растворение  $\text{I}_2$  в дистиллированной воде крайне слабое. При внесении 100 мг/л  $\text{I}_2$  в дистиллированную воду по истечении недели по суммарному поглощению обнаружено всего  $\sim 5$  мг/л йода, а остальной йод так и оставался кристалликом на дне колбы. Для его полного растворения потребовалось внесение в раствор йодида калия существенно превышающей концентрации. При наличии в воде растворителя нитратов (природная вода) при тех же условиях растворяется половина внесенного в раствор йода, т.е. растворимость становится значительно выше.

При нормальной pH-среде содержание  $\text{OH}^-$  и  $\text{H}^+$  в воде  $\sim 10$  мг/л. Это приводит к появлению в растворе  $\text{I}^-$ ,  $\text{IO}_3^-$  (в результате последовательного окисления), часть  $\text{I}_2$  образует с неионизованной водой комплекс, поглощающий при 460 нм. После появления  $\text{I}^-$  небольшая часть этих ионов при взаимодействии с  $\text{I}_2$  приводит к созданию трийодид-иона  $\text{I}_3^-$ . В балансе только небольшое количество исходного йода может перейти в растворенное

состояние. Этот процесс наблюдается при растворении йода в дистиллированной воде. При высокой общей минерализации воды за счет содержания в ней солей (в нашем случае  $\text{KNO}_3$ ) растворимость йода повышается в основном за счет образований ионов  $\text{I}^-$  и  $\text{NO}_3^-$ , что и наблюдается в спектре.

В насыщенных растворах йода общее количество  $\text{NO}_3^-$  в растворе велико, поэтому выделение на фоне поглощения нитрат-иона поглощения  $\text{I}^-$ , несомненно присутствующего в растворе, крайне затруднительно. Отнесение полос 202 nm не к поглощению комплекса молекулярного йода с водой, а к поглощению нитрат-иона обусловлено еще одним обстоятельством. Молекулярный йод при возбуждении светом короче 499 nm в принципе уже не может существовать в виде молекулы (в комплексе с разными растворителями молекула может быть чуть стабильнее), поэтому поглощение в области 202 nm не может принадлежать недиссоциированной молекуле йода.

Присутствие в воде азота в виде нитрат-иона, малый коэффициент молярной экстинкции комплекса йода с растворителем, слабое бесструктурное поглощения  $\text{IO}_3^-$  затрудняют оценку общего содержания йода в водах по спектру поглощения. Даже небольшое поглощение в области спектра 226 nm ( $\text{I}^-$ ) и 290 и 350 nm ( $\text{I}_3^-$ ) будет свидетельствовать о высоком содержании йода в воде, так как в виде йодид- и трийодид-иона связывается небольшое количество йода.

Сложное поведение йода в природных и инженерных средах и невысокие концентрации его присутствия стимулируют изучение йодсодержащих систем и развитие методов его корректного определения [22–24].

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Киреев С.В., Шнырев С.Л. Оптические методы детектирования долгоживущих изотопов йода. М.: НИЯУ МИФИ, 2010.
- [2] Василенко И.Я., Василенко О.И. // Энергия, экономика, техника, экология. 2003. № 5. С. 57–62.
- [3] Bichsel Y., Gunten U. // Anal. Chem. 1999. V. 71. P. 34–38.
- [4] Алукер Э.Д., Лучис Д.Ю., Чернов С.А. Электронные возбуждения и радиоломинесценция щелочно-галогидных кристаллов. Рига: Зинатне, 1979. 251 с.
- [5] Александров А.Б., Алукер Э.Д., Васильев И.А., Нечаев А.Ф., Чернов С.А. Введение в радиационную физико-химию поверхности щелочно-галогидных кристаллов. Рига: Зинатне, 1989. 244 с.
- [6] Грузинцев А.Н., Загороднев В.Н. // ФТТ. 2012. Т. 54. В. 1. С. 110–114.
- [7] Gerstenkorn S., Vergès J., Chevillard J. Atlas du Spectre d'Absorption de la Molécule d'Iode (11000–14000  $\text{cm}^{-1}$ ). / Ed. by Gerstenkorn S., Luc P., Chevillard J. Orsay: Edition CNRS II, 1982.
- [8] Прялкин Б.С., Муратова Н.Г. // Полифункциональные химические материалы и технологии. 2015. Т. 2. С. 165–169.
- [9] Киселев В.М., Багров И.В., Стародубцев А.М. // Опт. и спектр. 2018. Т. 124. В. 2. С. 197–201.
- [10] Быковский Ю.А., Котковский Г.Е., Кузнецов М.Б., Чистяков А.А. // ЖЭТФ. 1998. Т. 114. В. 1 (7). С. 1.
- [11] Refat M.S., El-Didamony A.M., Grabchev I. // Spectrochim. Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2007. V. 67. N 1. P. 58.
- [12] Киреев С.В., Симановский И.Г., Шнырев С.Л. // Инженерная физика. 2008. № 1. С. 2–28.
- [13] Киреев С.В., Симановский И.Г., Шнырев С.Л. // Инженерная физика. 2008. № 2. С. 37–46.
- [14] Kireev S.V., Simanovsky I.G., Shnyrev S.L. // Laser Physics. 2009. V. 19. N 9. P. 1939–1949.
- [15] Wei Y.J., Liu C.G., Mo L.P. // Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi. 2005. T. 25. № 1. С. 86–88.
- [16] Liu Z.-B., Tian J.-G., Zang W.-P. et al. // Optics Lett. 2004. V. 29. N 10. P. 1099.
- [17] Клубин В.В., Клубина К.А., Маковецкая К.Н. // Журн. физ. химии. 2017. Т. 91. № 4. С. 620–625; Klyubina V.V., Klyubina K.A., Makovetskaya K.N. // Russian J. Physical A. 2017. V. 91. N 4. P. 620–625.
- [18] Aluker N.L., Herrmann M.E., Suzdaltseva Ya.M. // Opt. Spectrosc. 2019. V. 127. N 6. P. 991–996.
- [19] Aluker N.L., Lavrentieva A.L., Suzdaltseva Y.M. // Opt. Spectrosc. 2020. V. 128. N 3. P. 422–428.
- [20] Palmer D.A., Ramette R.W., Mesmer R.E. // J. Solution Chem. 1984. V. 13. P. 673–683.
- [21] Schmidt E., Heiman P. // Anal. Chem. 1997. V. 69. P. 277–284.
- [22] Mamane-Gravetz H., Ducoste J.J., Linden K.G. // Proceedings Intern. Ultraviolet Association Conference. Whistler, British Columbia, 2005. P. 10.
- [23] Gottardi W. // Archiv der Pharmazie: An Inter. J. Pharmaceutical and Medicinal Chemistry. 1999. V. 332. N 5. P. 151–157.
- [24] Silva R., Oliveira A. // J. Braz. Chem. Soc. 1998. V. 9. P. 171.