

УДК 535.37

Методические вопросы исследования люминесценции воды
биохемилюминометром БХЛ-06.

Ермолин С.В. (1), Иванова И.П. (1), Трофимова С.В. (1), Князев Д.И. (1),
Пискарев И.М. (i.m.piskarev@gmail.com) (2)

- (1) Нижегородская государственная медицинская академия федерального агентства по здравоохранению и социальному развитию,
(2) Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Москва, 119992, Ленинские горы, МГУ, НИИЯФ МГУ

E-mail: i.m.piskarev@gmail.com

Аннотация

В работе исследована спонтанная люминесценция дистиллированной бидистиллированной воды. Установлен уровень шума прибора, который определяет предел чувствительности методики. В свежеприготовленной дистиллированной воде люминесценция не превышает фонового свечения, регистрируемого прибором. Под действием внешнего радиационного фона в воде накапливаются продукты радиолиза, вызывающие люминесценцию. Установлено, что люминесценция воды наблюдается в красной области спектра и обусловлена распадом димера синглетного кислорода. Показано, что наличие бикарбонатов в воде увеличивает стационарную концентрацию перекиси водорода. Спонтанное свечение раствора усиливается с увеличением уровня радиационного фона, плотности раствора и среднего атомного номера элементов в составе растворённых веществ. Для удобства пользователя числа фотонов выражаются как в абсолютных единицах, так и в относительных, применяемых в приборе БХЛ-06: в милливольтках.

Введение. Известно, что вода светится, только с низкой интенсивностью. Обнаружить такое свечение можно, используя высокочувствительные светоприёмники. К настоящему времени созданы приборы – люминометры на основе фотоэлектронных умножителей, позволяющие регистрировать потоки фотонов $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$ [1]. Регистрация люминесценции свежеприготовленной бидистиллированной воды затруднительна, поскольку чаще всего она не превышает нижнего порога, регистрируемого прибором. Однако, при контакте с воздухом, вода поглощает углекислый газ и подвергается воздействию радиационного фона (космического излучения). Свечение такой воды уже фиксируется. Добавление в воду перекиси водорода, гидрокарбонатов, изменение pH могут усиливать свечение [2]. Исследования люминесценции воды необходимы для количественного анализа свободно-радикальных процессов, наблюдаемых в биологических субстратах под воздействием физико-химических факторов. Помехи в исследовании люминесценции воды создаются шумом прибора и спонтанным излучением, одной из причин которого является радиационный фон. Данная работа посвящена анализу роли радиационного фона, как одного из факторов, обуславливающих спонтанное свечение воды. Цель работы – математическое моделирование процесса люминесценции воды, оценка конкретных механизмов и роли различных активных частиц, радикалов и молекулярных продуктов.

Методика эксперимента. Световое излучение регистрировалось биохемилюминометром БХЛ-06 (Н.Новгород). Калибровку прибора осуществляли по эталонному источнику света известной интенсивности. Светосумма в 1 мВ (относительная единица по шкале прибора) соответствует $1.37 \cdot 10^6$ фотонов. Объём пробы составлял 1.2 мл. Кювета с пробой располагалась почти вплотную к фотокатоду ФЭУ, что обеспечивало высокую эффективность регистрации (телесный угол $\Omega = \pi$). Регистрировалась люминесценция дистиллированной и бидистиллированной воды, воды, насыщенной NaHCO_3 , а также с добавлением реактива Фентона.

Раствор перекиси водорода для реактива Фентона требуемой концентрации готовился предварительно, раствор FeSO_4 – непосредственно перед началом эксперимента. Регистрация излучения начиналась через 0.5 - 1 секунду после смешивания растворов перекиси и FeSO_4 . Это время необходимо для того, чтобы добавить перекись и перевести прибор в режим измерения интенсивности люминесценции. Использовались реактивы ЧДА, дважды дистиллированная и дистиллированная вода ($\text{pH} = 6$). При регистрации излучения образца оценивали шум регистрирующего прибора непосредственно до и после каждого измерения. Шум прибора автоматически вычитался.

Время регистрации люминесценции образцов составляло 30 секунд. Каждая точка обсчитывалась в 10 – 12 повторностях. Радиационный фон контролировался дозиметром ДБГБ-01 "Ратон-901" непосредственно перед и во время измерения светового выхода образцов. Интервал отсчёта дозиметра составлял 40 секунд. Чистота растворов, состав продуктов реакции на разных стадиях контролировался путём наблюдения УФ-спектров с помощью спектрофлюориметра Флюорат-02 Панорама (С.Петербург).

Спектральные характеристики излучения качественно оценивались с помощью светофильтров из синих и красных пластиковых плёнок толщиной 0.5 мм. Спектр светопропускания плёнок измерялся прибором Флюорат-02 Панорама. Полоса пропускания синего фильтра на уровне не менее 10% от максимума лежит в диапазоне от 410 до 590 нм, красного - от 590 до 750 нм. Отбирались плёнки, не дающие вторичного излучения в видимой области спектра.

Решение системы уравнений химической кинетики осуществлялось с помощью пакета MathCad 11.

Дисперсия шума. Нижний предел интенсивности излучения, которую можно зарегистрировать, определяется флуктуациями шума. Среднеквадратичные флуктуации шума составляют от 200 до 500 импульсов в секунду в зависимости от времени работы прибора. Непосредственно после

включения прибора шум минимален, со временем он постепенно возрастает. Минимально регистрируемый эффект составляет около 200 импульсов в 1 секунду. Дисперсия шума и характеристики фонового свечения воды приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики шума биохемилюминометра БХЛ-6 и люминесценции дистиллированной воды за 30 секунд при внешнем радиационном фоне 0.12 мкЗв/ч

Измеряемая величина	Единицы измерения		
	мВ	Число фотонов образца V=1.2 мл	Моль/л
Дисперсия шума	$0.01^{+0.01}_{-0.009}$	$1.37 \cdot 10^4$	$1.9 \cdot 10^{-17}$
Люминесценция воды	0.25 ± 0.1	$3.4 \cdot 10^5$	$4.7 \cdot 10^{-16}$

Видно, что дисперсия шума меняется в широких пределах, это зависит от состояния прибора. Поэтому предел обнаружения минимального эффекта меняется.

Кинетическая модель процесса. Модель процесса включала реакцию Фентона, взаимодействие радикалов, продуктов этой реакции, образование и высвечивание синглетного кислорода. Схема реакций представлена в таблице 2. Константы скорости реакций представлены из работы [3]. Концентрации ионов OH^- и H^+ (рН раствора) задавались в виде коэффициентов. Модель включает взаимодействие двухвалентного железа с перекисью водорода и последующее образование радикалов OH^\bullet , HO_2^\bullet , $\text{O}_2^{\bullet-}$ и синглетного кислорода, диссоциацию перекиси водорода $\text{H}_2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{HO}_2^- + \text{H}^+$, $\text{pK}_a = 11.5$ (реакции 12, 13) и равновесие $\text{HO}_2^\bullet \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{O}_2^{\bullet-}$, $\text{pK}_a = 4.8$ (реакции 7, 8). Предполагалось, что в нейтральной и щелочной среде трёхвалентное железо выпадает в осадок: $\text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3\downarrow$, реакция 20, табл. 2. Под действием внешнего ионизирующего излучения происходит радиолиз воды.

Состав продуктов радиолиза и их реакции известны [4]. Эти реакции включены в схему расчёта (табл. 2). Решение системы уравнений химической кинетики осуществлялось с помощью пакета MathCad 11. Задача численного моделирования заключалась в том, чтобы оценить вклад конкретных механизмов и получить оценки концентрации активных частиц (радикалов и молекулярных продуктов).

Таблица 2

Константы скорости реакций в растворе Фентона

№№	Реакция	Константа, л/(моль·с), [4]
1.	$\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^\bullet + \text{OH}^-$	$k_1 = 56$
2.	$\text{OH}^\bullet + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2^\bullet + \text{H}_2\text{O}$	$k_2 = 3 \times 10^7$
3.	$\text{HO}_2^\bullet + \text{HO}_2^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{O}_2(\text{a}^1\Delta_g)$	$k_3 = 8.3 \times 10^5$
4.	$\text{Fe}^{2+} + \text{OH}^\bullet \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^-$	$k_4 = 3 \times 10^8$
5.	$\text{OH}^\bullet + \text{OH}^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}(\text{O}_2 + \text{O}_2(\text{a}^1\Delta_g))$	$k_5 = 5.5 \times 10^9$
6.	$\text{OH}^\bullet + \text{HO}_2^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + \text{O}_2(\text{a}^1\Delta_g)$	$k_6 = 7.1 \times 10^9$
7.	$\text{HO}_2^\bullet \rightarrow \text{H}^+ + \text{O}_2^{\bullet-}$	$k_7 = 7.5 \times 10^6$
8.	$\text{H}^+ + \text{O}_2^{\bullet-} \rightarrow \text{HO}_2^\bullet$	$k_8 = 1.2 \times 10^2$ $\text{pK}_a = 4.8$
9.	$\text{HO}_2^\bullet + \text{O}_2^{\bullet-} \rightarrow \text{HO}_2^- + \text{O}_2$	$k_9 = 9.7 \times 10^7$
10.	$\text{HO}_2^\bullet + \text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2^{\bullet-} + \text{H}_2\text{O}$	$k_{10} = 10^{10}$
11.	$\text{O}_2^{\bullet-} + \text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{O}_2$	$k_{11} = 1.9 \times 10^9$
12.	$\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2^- + \text{H}^+$	$k_{12} = 2 \times 10^{-2}$
13.	$\text{HO}_2^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	$k_{13} = 10^{10}$ $\text{pK}_a = 11.5$
14.	$\text{OH}^\bullet + \text{HO}_2^- \rightarrow \text{HO}_2^\bullet + \text{OH}^-$	$k_{14} = 7.5 \times 10^9$
15.	$\text{O}_2^{\bullet-} + \text{OH}^\bullet + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2(\text{a}^1\Delta_g)$	$k_{15} = 10^{10}$
16.	$\text{O}_2^{\bullet-} + \text{H}^+ \rightarrow \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{a}^1\Delta_g)$	$k_{16} = 10^{10}$
17a.	$\text{HCO}_3^- + \text{OH}^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^{\bullet-}$ $\text{CO}_3^{\bullet-} + \text{OH}^\bullet \rightarrow \text{CO}_2 + \text{HO}_2^-$	

17.	$\text{HCO}_3^- + 2\text{OH}^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{HO}_2^-$	$k_{17} = 4 \times 10^7$
18.	$e_{\text{aq}}^- + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{O}_2^{\bullet-} + \text{M}$	$k_{18} = 2 \times 10^{10}$
19.	$\text{H}^\bullet + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{HO}_2^\bullet + \text{M}$	$k_{19} = 2 \times 10^{10}$
20.	$\text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3$	$k_{20} = 10^6, \text{pH} = 12$
21.	$\text{O}_2(a^1\Delta_g) + \text{O}_2(a^1\Delta_g) \rightarrow 2\text{O}_2 + \gamma$	$k_{21} = 0.1$
22.	$\text{O}_2(a^1\Delta_g) + \text{O}_2(a^1\Delta_g) \rightarrow \text{продукты}$	$k_{22} = 10^3$
23.	Распад $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$	$\tau_{1/2} = 2.9 \times 10^{-4} \text{ с}$

Выход продуктов радиолита воды, создаваемых радиационным фоном. Мощность дозы, создаваемой радиационным фоном, который определяется космическим излучением и другими факторами, составляет от 0.05 до 0.3 мкЗв/ч. В воде благодаря радиационному излучению образуются продукты радиолита. Выход первичных продуктов радиолита при $\text{pH} = 7$ приведен в таблице 3.

Таблица 3

Выход первичных продуктов радиолита при $\text{pH} = 7$ [4].

Продукт	e_{aq}^-	H^\bullet	OH^\bullet	H_2O_2	H_2
Выход на 100 эВ	2.8	0.5	2.8	0.7	0.45
Преобразуются в радикалы	$\text{O}_2^{\bullet-}$	HO_2^\bullet	-	-	-
Выход моль/(кг сек)	$9.5 \cdot 10^{-18}$	$1.7 \cdot 10^{-18}$	$9.5 \cdot 10^{-18}$	$2.4 \cdot 10^{-18}$	$1.53 \cdot 10^{-18}$

Значения выходов рассчитаны при среднем радиационном фоне 0.12 мкЗв/ч. Это соответствует энергии, выделяемой в 1 литре воды, 2.06×10^8 эВ/с. Образующиеся при радиолите частицы, обладающие восстановительными свойствами (гидратированный электрон и атомарный водород) взаимодействуют с кислородом, растворённым в воде, образуя радикалы $\text{O}_2^{\bullet-}$ и HO_2^\bullet (реакции 18 и 19).

Результаты и обсуждение

Люминесценция воды. При протекании в воде реакций с участием свободных радикалов, инициированных реактивом Фентона, наблюдается свечение, регистрируемое прибором БХЛ-06. С помощью красного и синего светофильтров оценивался спектральный состав излучения. Установлено, что синий светофильтр ослабляет свечение более, чем в 10 раз, а с красным фильтром интенсивность свечения не меняется. При регистрации излучения, воды без реактива Фентона, наблюдалось аналогичное соотношение. Люминесценция регистрируется, если в пробе присутствуют продукты реакций в возбуждённом состоянии. Почти все продукты реакций, приведённые в таблице 2, могут образовывать возбуждённые состояния, высвечивающие в УФ-области спектра (длина волны меньше 400 нм). В красной области может высвечиваться только димер синглетного кислорода ($\lambda = 480, 535$ и 580 нм) [5 – 8].

Проанализируем механизмы образования синглетного кислорода. Правила отбора по спину разрешают образование синглетного кислорода вместе с триплетным в реакциях (3, 5, 6. табл. 2). Соотношение вероятностей заселения синглетного и триплетного состояний определяется правилами квантовой механики и равно 1:3. Только синглетный кислород может образовываться в реакциях (15, 16). Расчёт показал, что выход $O_2(a^1\Delta_g)$ в реакциях (3, 5, 6) мал, так как мала концентрация радикалов HO_2^\bullet и OH^\bullet . Поэтому основным механизмом образования синглетного кислорода являются реакции с радикалом $O_2^{\bullet-}$ (15, 16).

Стационарные концентрации продуктов радиолиза.

При постоянном действии радиационного фона продукты радиолиза накапливаются, и устанавливается их стационарная концентрация. Стационарная концентрация зависит от уровня радиационного фона. В таблице 4 приведены рассчитанные значения стационарной концентрации короткоживущих продуктов и время установления стационарной

концентрации. Время установления стационарной концентрации зависит от уровня радиационного фона. Там же приведены расчётные значения выхода фотонов за 30 секунд.

Таблица 4

Стационарные концентрации активных частиц, образующихся в воде под действием радиационного фона (расчёт).

Продукт радиолиза	Концентрация, моль/л при разном уровне радиационного фона			Время установления стационарной концентрации, сек
	0.012 мкЗв/ч	0.12 мкЗв/ч	1.2 мкЗв/ч	
$O_2^{\bullet-}$	$1 \cdot 10^{-16}$	$1.4 \cdot 10^{-15}$	$1.9 \cdot 10^{-14}$	100 – 200
$O_2(a^1\Delta_g)$	$7 \cdot 10^{-16}$	$2.4 \cdot 10^{-15}$	$8 \cdot 10^{-15}$	1000 – 1500
OH^{\bullet}	10^{-24}	10^{-23}	10^{-22}	1
HO_2^{\bullet}	$2 \cdot 10^{-26}$	$3 \cdot 10^{-25}$	$3 \cdot 10^{-24}$	1
Свечение за 30 сек	$2 \cdot 10^{-16}$ моль/л	$4.7 \cdot 10^{-16}$	$2.1 \cdot 10^{-15}$	Не менее 20 минут

Перекись водорода накапливается как за счёт прямого образования под действием радиации, так и в реакциях с радикалами (реакции 3, 16 и 17). В реакции бикарбонатов с гидроксильными радикалами первоначально образуются ион-радикалы CO_3^{2-} . Затем они снова взаимодействуют с гидроксильными радикалами, образуя продукт диссоциации перекиси водорода HO_2^- и углекислый газ. В замкнутом объёме углекислый газ снова растворяется в воде, и процесс продолжается (реакции 17а). Таким образом, бикарбонаты влияют на концентрацию перекиси водорода. Но бикарбонаты не влияют на стационарную концентрацию короткоживущих продуктов, приведённых в таблице 4. Стационарные концентрации перекиси при разных уровнях радиационного фона и разных концентрациях бикарбонатов

приведены в таблице 5. Наличие в растворе двухвалентного железа не влияет на стационарную концентрацию перекиси до $[Fe^{2+}] < 10^{-8}$ моль/л. При больших концентрациях железа концентрация перекиси уменьшается.

Таблица 5

Стационарная концентрация перекиси водорода, образующейся в воде под действием радиационного фона (расчёт). Расчётное время установления стационарной концентрации 10^7 секунд.

[HCO ₃ ⁻] (моль/л)	[H ₂ O ₂] (моль/л) при разном уровне радиационного фона:		
	0.012 мкЗв/ч	0.12 мкЗв/ч	1.2 мкЗв/ч
10 ⁻²	2.5 10 ⁻¹¹	2.3 10 ⁻¹⁰	2.5 10 ⁻⁹
10 ⁻³	2.5 10 ⁻¹¹	2.3 10 ⁻¹⁰	2.3 10 ⁻⁹
0	1.1 10 ⁻¹¹	8 10 ⁻¹¹	6.2 10 ⁻¹⁰

В свежеприготовленной дистиллированной воде свечение не наблюдается. При отстаивании на воздухе не менее 20 минут всегда наблюдается свечение. Расчётные значения интенсивности свечения, выраженные в разных единицах, приведены в таблице 6. Фоновое свечение воды необходимо учитывать, когда измеренная за 30 секунд светосумма не превышает 1 мВ (1.3 10⁶ фотонов).

Таблица 6

Люминесценция за 30 секунд отстоявшейся не менее 20 минут воды (расчёт).

Внешний радиационный фон, мкЗв/ч	Единицы измерения		
	Моль/л	Фотонов из образца 1.2 мл	мВ
0.012	2 10 ⁻¹⁶	1.0 10 ⁵	0.07
0.12	4.7 10 ⁻¹⁶	2.3 10 ⁵	0.2
1.2	2.1 10 ⁻¹⁵	1.05 10 ⁶	0.8

Механизм свечения. Основным источником свечения может быть синглетный кислород. Синглетный кислород образуется преимущественно в реакциях 15, 16 из ион-радикалов $O_2^{\bullet-}$. В растворе в случае реактива Фентона трёхвалентное железо взаимодействует с $O_2^{\bullet-}$ (реакция 11, табл. 2), значительно уменьшая концентрацию этих частиц. С уменьшением концентрации $O_2^{\bullet-}$ уменьшается и выход синглетного кислорода, поэтому в растворе Фентона всегда наблюдается короткая вспышка излучения сразу после смешивания реагентов, которая существенно меньше полного времени реакции при данных концентрациях реагентов [9]. Когда в растворе железа нет, ион-радикалы $O_2^{\bullet-}$ накапливаются, и количество образующихся молекул синглетного кислорода растёт. Время жизни синглетного кислорода в воде с низкой концентрацией примесей составляет около 40 минут. Вероятность образования димера примерно на 3 порядка больше, чем самопроизвольный распад [10]. Расчёт показал, что тушение синглетного кислорода на стенках сосуда и в реакциях с другими частицами незначительно. С повышением концентрации $O_2(a^1\Delta_g)$ определяющую роль в их гибели играет реакция 22 (табл. 2), продукты которой не дают излучения в видимой области спектра. При изменении радиационного фона меняется концентрация $O_2^{\bullet-}$ и $O_2(a^1\Delta_g)$. За счёт этого меняется выход свечения. Свечение определяется концентрацией синглетного кислорода. Время установления стационарной концентрации которого порядка 1000 секунд. Поэтому быстрые колебания интенсивности не успевают заметно повлиять на выход излучения.

Кинетика изменения концентрации радикалов при введении реактива Фентона приводится в работе [9]. Результаты расчёта и экспериментальные значения приведены в таблице 7. Как отмечалось ранее, одним из основных механизмов расходования $O_2^{\bullet-}$ является взаимодействие с Fe^{3+} . Сразу при смешивании реагентов Fe^{3+} ещё не образовался, поэтому $O_2^{\bullet-}$ быстро накапливается. Основным источником образования синглетного кислорода

является радикал $O_2^{\bullet-}$, и при большой концентрации $O_2^{\bullet-}$ свечение оказывается сильнее.

Таблица 7

Люминесценция раствора Фентона и дистиллированной воды

Состав раствора	Светосумма за 30 секунд		
	Экспериментальные значения	Расчёт, начало регистрации после смешивания растворов	
		Сразу	Через 3 секунды
$[Fe^{2+}] = 10^{-3}$ моль/л $[H_2O_2] = 10^{-4}$ моль/л	$(1.1 \pm 0.4) 10^{-14}$ моль/л (6 ± 2) мВ	$3.4 10^{-14}$ моль/л	$1.8 10^{-14}$ моль/л
$[Fe^{2+}] = 10^{-3}$ моль/л $[H_2O_2] = 10^{-5}$ моль/л	$(3 \pm 1) 10^{-15}$ моль/л (1.8 ± 0.6) мВ	10^{-15} моль/л	$9 10^{-16}$ моль/л
$[Fe^{2+}] = 10^{-3}$ моль/л $[H_2O_2] = 10^{-6}$ моль/л	$(5.6 \pm 1.6) 10^{-16}$ моль/л (0.3 ± 0.1) мВ	$6.1 10^{-16}$ моль/л	$5.5 10^{-16}$ моль/л
Свежая бидистиллированная вода	Меньше $2 10^{-17}$ моль/л Меньше 0.01 мВ	$1 10^{-17}$	-
Та же вода через 3 часа	$(4.7 \pm 2) 10^{-16}$ моль/л (0.25 ± 0.1) мВ	$5.6 10^{-16}$	-
Насыщенный раствор $NaHCO_3$	$(8.5 \pm 2) 10^{-16}$ моль/л (0.4 ± 0.1) мВ	$9.2 10^{-16}$ моль/л	-

В процессе реакции Фентона появляются и накапливаются ионы Fe^{3+} , которые расходуют $O_2^{\bullet-}$. Поэтому интенсивность свечения сразу после смешивания реагентов максимальна, затем в ходе реакции она уменьшается. Задержка времени начала регистрации может сильно влиять на результаты измерений (см. табл. 7). Рассчитанное значение световыхода для свежей бидистиллированной воды, в которой ещё не достигнуты стационарные

концентрации продуктов, ниже порога обнаруживаемости, определяемого флуктуациями шума. Через 3 часа, когда стационарная концентрация с гарантией установлена, наблюдаемая интенсивность свечения согласуется с расчётной. Когда в воде растворяются вещества, плотность раствора увеличивается, что приводит к росту ионизационных потерь излучения в образце. Если в состав растворённой соли входят химические элементы с атомным номером, заметно больше атомного номера кислорода, то средний атомный номер раствора увеличивается и потери энергии, создаваемой радиационным фоном, тоже увеличиваются [11]. Поэтому фоновое свечение раствора превышает свечение дистиллированной воды без добавок.

ВЫВОДЫ

1. Определены границы уровня шума прибора, определяющего предел чувствительности методики.
2. Установлено, что люминесценция воды происходит в красной области спектра и обусловлена распадом синглетного кислорода.
3. Под действием внешнего радиационного фона в воде накапливаются продукты радиолиза, вызывающие люминесценцию. В свежеприготовленной дистиллированной воде свечение не регистрируется.
4. Бикарбонаты увеличивают стационарную концентрацию перекиси водорода.
5. Фоновая люминесценция раствора увеличивается с увеличением уровня радиационного фона, удельного веса раствора и среднего атомного номера растворённых веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмина Е.И., Нелюбин А.С., Щенников М.К. //Межвузовский сборник биохимии и биофизики микроорганизмов. Горький.: 1983. С. 179.
2. Voeikov V.L., Do Ming Ha, Mukhitova O.G., Vilenskaya N.D., Malishenko S.I., Bogachuk A.S.// Int. J. of Design & Nature and Ecodynamics. 2010. V. 5. No.1. P.30.
3. Пикаев А.К., Кабакчи С.А. Реакционная способность первичных продуктов радиолиза воды. Справочник. 1982. М.: Энергоатомиздат. С. 201.
4. Бугаенко Л.Т., Кузьмин М.Г., Полак Л.С. М.: Химия. 1988. 368 с.
5. Физика и техника спектрального анализа. Люминесцентный анализ / Под ред. Константиновой-Шлезингер М.А. М.: Гос. Издательство физ.-мат. Литературы. М.: 1961. С. 138.
6. Васильев Р.Ф. //Успехи физических наук. 1966. Т. 89. вып. 3. С. 409.
7. Владимиров Ю.А., Проскурина Е.В. //Успехи биологической химии. 2009. Т. 49. С. 341.
8. Владимиров Ю.А., Потапенко А.Я. Физико-химические основы фотобиологических процессов. 1989. М.: Высшая школа.
9. Аристова Н.А., Иванова И.П., Трофимова С.В., Князев Д.И., Пискарев И.М. Люминол-зависимое свечение, сопровождающее реакцию Фентона. // Электронный журнал «Исследовано в России», 008. Стр. 77-86. 2011 г. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2011/008.pdf>
10. Кулагин Ю.А., Шелепин Л.А., Ярыгина В.Н. Кинетика процессов в газовых средах, содержащих метастабильный кислород//Труды ФИАН имю П.Н.Лебедева. 1994. Т. 218. С. 166 – 227.
11. Мухин К.Н. Введение в ядерную физику. М.: 1963. С. 175.