

РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ 2-ФТОРЭТАНОЛА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

© 2020 г. С. Д. Бринкевич^а, *, О. В. Тугай^а, А. А. Сладкова^а, О. И. Шадыро^а

^аБелорусский государственный университет, просп. Независимости, 4, Минск, 220030 Республика Беларусь

*E-mail: BrinkevichSD@bsu.by

Поступила в редакцию 16.05.2020 г.

После доработки 16.05.2020 г.

Принята к публикации 06.07.2020 г.

Методом стационарного радиолитического изучения радиационно-индуцированных превращений 2-фторэтанол в разбавленных водных растворах в качестве модельной системы для установления закономерностей авторадилитического дегалогенирования радиофармпрепарата “2-[¹⁸F]фтордезоксиглюкоза”. Разработана реагентно-хроматографическая методика определения фторид-аниона на фоне фторорганических соединений. Установлено, что дегалогенирование 2-фторэтанол в водных растворах индуцируют $\cdot\text{OH}$ и $\text{H}\cdot$. В отличие от бром- и хлоргидринов 2-фторэтанол не взаимодействует с e_{aq}^- по механизму диссоциативного захвата. Показано, что за счет окисления гидроксилсодержащих углеродцентрированных радикалов 2-фторэтанол O_2 снижает радиационно-химический выход фторида в 2 раза. Рассчитанная с использованием инструментария метода конкурирующих реакций константа мономолекулярного дегалогенирования радикала 2-фторэтанол составляет $3.9 \times 10^6 \text{ c}^{-1}$.

Ключевые слова: стационарный радиолитический, дегалогенирование, фторид, 2-фторэтанол, ФДГ

DOI: 10.31857/S0023119320060030

ВВЕДЕНИЕ

Радиолитическое изучение фторорганических соединений в водных растворах и по сей день остается слабоизученным разделом химии высоких энергий, даже несмотря на то, что радиационно-индуцированные процессы с участием этой группы веществ имеют важное прикладное значение. Так, электронное облучение полифторированных соединений (например, перфтороктановой кислоты) в растворах и в сложных дисперсных системах (почве) рассматривается в качестве промышленной технологии переработки этих стойких органических загрязнителей [1]. Одной из основных проблем производителей радиофармпрепаратов (РФП), меченных изотопом фтор-18, являются радиационно-индуцированные превращения меченых соединений под действием собственного излучения – авторадилитический [2]. В большинстве случаев этот процесс сопровождается элиминированием [¹⁸F]фторид-аниона, который накапливается в костной ткани и обладает из-за этого высокой радиобиологической опасностью.

Для 2-[¹⁸F]фтор-2-дезоксид-D-глюкозы ([¹⁸F]ФДГ), которая является наиболее массовым РФП для диагностики онкологических, кардиологи-

ческих и неврологических заболеваний методом позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) [3], накопление радиолитического фторида является ключевым фактором, ограничивающим срок годности готовой лекарственной формы [4]. При высоких начальных объемных активностях [¹⁸F]ФДГ, которые обеспечивают наименьшую себестоимость производства [5], препарат становится непригодным к диагностическому применению уже через 1 ч после синтеза [6].

Для улучшения качества РФП и увеличения сроков его хранения активно ведутся работы, посвященные исследованию основных закономерностей авторадилитического [4, 6–8] и тестированию стабилизаторов [6, 8]. Однако идентификация нерадиоактивных продуктов разложения [¹⁸F]ФДГ, а также установление механизма авторадилитического этого меченого соединения оказались сложно выполнимыми задачами в силу высокой радиоактивности коммерческих партий РФП (до нескольких Зв/час) и наномолярных концентраций радиоактивного вещества в растворе [9]. Для решения обозначенных проблем, связанных с исследованием авторадилитического РФП, мы предлагаем использовать стационарный радиолитический метод изучения модельных соединений и нерадиоактивной копии [¹⁸F]ФДГ.

В настоящей работе будут рассмотрены радиационно-индуцированные превращения простейшего фторгидрина – 2-фторэтанола в разбавленных (10^{-3} моль/литр) водных растворах.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе без предварительной очистки использовали следующие коммерчески доступные вещества: 2,4-динитрофенилгидразин (ДНФГ) 97%-й чистоты, 2-фторэтанол (95%), триметилхлорсилан, натрия фторид (99.9%), водный 37% раствор формальдегида, соляную кислоту, гликолевый альдегид (>98%), формиат аммония (>99%), *трет*-бутанол фирмы Sigma-Aldrich; калия гидроксид и хлорную кислоту фирмы Arlichem; метанол для ВЭЖХ “J.T. Baker”; гексан для хроматографии “Криохим”. Высокоочищенный ацетальдегид получали методом кислотного гидролиза паральдегида. Первичный дистиллят сутки обезвоживали над Na_2SO_4 , после чего повторно перегоняли. Полученный таким образом сухой ацетальдегид разливали по ампулам, запаивали и хранили при -20°C не более 5 лет. Водные растворы 2-фторэтанола готовили весовым методом, их насыщение газами, ампулирование проводили аналогично [10].

Неорганический фторид на фоне фторорганических соединений в водных растворах определяли по адаптированной реагентно-хроматографической методике [11]. К 1 мл облученного водного раствора 2-фторэтанола, заранее охлажденного в ледяной бане, прибавляли 2.5 мл 1.2 М раствора HCl и 20 мкл триметилхлорсилана. Полученную смесь тщательно перемешивали на ультразвуковой бане со льдом в течение 5 мин. Образующийся фтортриметилсилан экстрагировали 980 мкл гексана на ультразвуковой бане в течение 5 мин на холоде. Для газохроматографического анализа отбирали 600 мкл верхнего органического слоя. В плотно закрытой виале при $+4^\circ\text{C}$ полученный раствор может храниться до суток.

Количественный анализ фтортриметилсилана выполняли на Shimadzu GC-17AAF/APC с колонкой RTX502.2. Условия анализа: начальная температура колонки – 40°C , изотермический режим – 2 мин и далее градиент $6^\circ\text{C}/\text{мин}$ до температуры 200°C ; температура испарителя – 220°C , детектора – 250°C ; скорость газа-носителя (азота) – 21 см/с; объем вводимой пробы – 1 мкл. Определение концентрации проводили методом внешнего стандарта. Экспериментально определенный предел детектирования фторид-аниона на фоне высоких концентраций фторорганических соединений – не менее 1×10^{-6} моль/л, линейность – 2.5×10^{-6} – 2.5×10^{-4} моль/л.

Анализ карбонильных продуктов радиолитического распада 2-фторэтанола проводили в форме аддуктов с ДНФГ (гидразонов) на хроматографе Shimadzu LCMS-2020 с колонкой Shim-pack VP-ODS C18

длинной 150 мм и последовательно соединенными диодно-матричным (PDA) и масс-спектрометрическим детекторами. Условия проведения хроматографического анализа: подвижная фаза – метанол : вода в объемном соотношении 70 : 30; скорость подачи элюента – 0.8 мл/мин, температура термостата – 35°C ; объем вводимой пробы – 1 мкл. Количественный анализ выполняли по поглощению аддуктов с ДНФГ при 366 нм с использованием внешних стандартов карбонильных соединений. Идентификацию гидразонов выполняли масс-спектрометрически: метод ионизации – электроспрей с отрицательной ионизацией (ESI-); напряжение интерфейса – 1.5 кВ; напряжение на детекторе – 1.20 кВ; температура блока нагревания и десольватации – 400 и 250°C соответственно; поток газа распылителя – 1.5 л/мин.

Для приготовления дериватизирующего реактива 0.03 г ДНФГ и 6.2 мл концентрированной соляной кислоты вносили в мерную колбу объемом 100 мл и доводили до метки метанолом. Для получения гидразонов карбонильных соединений исследуемые пробы смешивали в объемном соотношении 1 : 1 с дериватизирующим агентом и выдерживали 15 мин до анализа.

Концентрацию 2-фторэтанола в растворе определяли газохроматографически на Shimadzu GC-17AAF/APC с капиллярной колонкой RTX-Wax и пламенно-ионизационным детектором, условия анализа аналогичны описанным в работе [10]. Анализ пероксида водорода выполняли реагентно-фотометрическим методом с TiOSO_4 согласно [12].

Облучение образцов проводили на установке МРХ- γ -25М с источником ^{60}Co при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$. Мощность поглощенной дозы составляла 0.148 ± 0.008 Гр/с по результатам дозиметрии с ферросульфатной системой Фрикке. Интервал поглощенных доз 0.089–1.066 кГр. Для получения величин радиационно-химических выходов использовали результаты не менее трех независимых экспериментов. Значение ошибки определения радиационно-химических выходов рассчитывали в программе Origin 8.1 Pro методом наименьших квадратов с использованием коэффициента доверительной вероятности 0.95.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в работе значения радиационно-химических выходов продуктов радиолитического распада 2-фторэтанола в водных растворах с концентрацией 10^{-3} моль/л приведены в табл. 1. Можно заметить, что основным типом радиолитических превращений исследуемого вещества является дегалогенирование, причем величины выходов фторид-аниона и, в меньшей степени, разложения исследуемого вещества сильно зависели от условий проведения облучения. В качестве минор-

Таблица 1. Выходы продуктов радиационно-индуцированных превращений 2-фторэтанола в водных растворах с концентрацией 10^{-3} моль/л

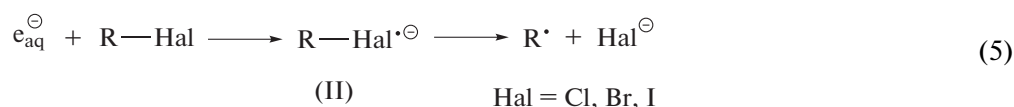
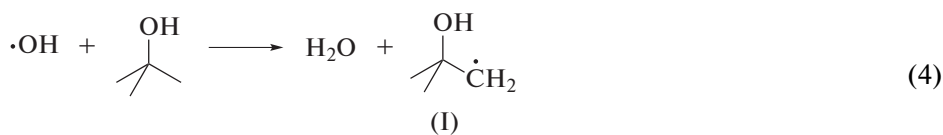
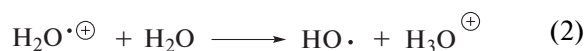
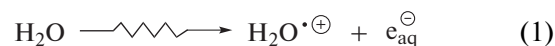
Радиационно-химические выходы, молекула/100эВ		Условия облучения			
		Ar	<i>t</i> -BuOH + Ar	N ₂ O	O ₂
Разложение 2-фторэтанола		2.58 ± 0.27	1.72 ± 0.71	4.54 ± 0.44	2.13 ± 0.75
Продукты радиолиза	Фторид-анион	2.79 ± 0.18	0.21 ± 0.03	3.18 ± 0.30	1.43 ± 0.26
	Ацетальдегид	0.14 ± 0.02	0.03 ± 0.01	0.13 ± 0.02	0.02 ± 0.01
	Формальдегид	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.61 ± 0.06
	Гликолевый альдегид	0.05 ± 0.01	0	0.17 ± 0.04	0.30 ± 0.04
	Пероксид водорода	0.35 ± 0.07	0	1.00 ± 0.09	2.38 ± 0.12

ных продуктов радиолиза мы детектировали формальдегид, ацетальдегид и гликолевый альдегид.

В деаэрированных водных растворах 2-фторэтанола выход фторид-аниона соответствует G_{OH} и заметно превышает соответствующие величины для неорганического фосфата при облучении 1 мМ водных растворов 1-глицерофосфата и 1-глюкозофосфата (соответственно, 2.23 ± 0.07 и 2.00 ± 0.07 ионов/100 эВ [13]). При этом значения констант свободнорадикального дефосфорилирования гидроксилсодержащих органических фосфатов считаются одними из самых больших для монаррадикальных радиационно-индуцированных процессов.

Радиолиз исследуемого вещества в деаэрированном 0.1 М водном растворе *трет*-бутанола позволяет количественно конвертировать $\cdot\text{OH}$ радикалы в

менее реакционноспособные углерод-центрированные радикалы (I) по реакции (4). В этих условиях наблюдается более чем десятикратное снижение радиационно-химического выхода фторида по сравнению с системой без *t*-BuOH, что свидетельствует о малой вероятности реализации диссоциативного захвата гидратированного электрона, характерного для хлор-, бром- и йодорганических соединений, по реакции (5).

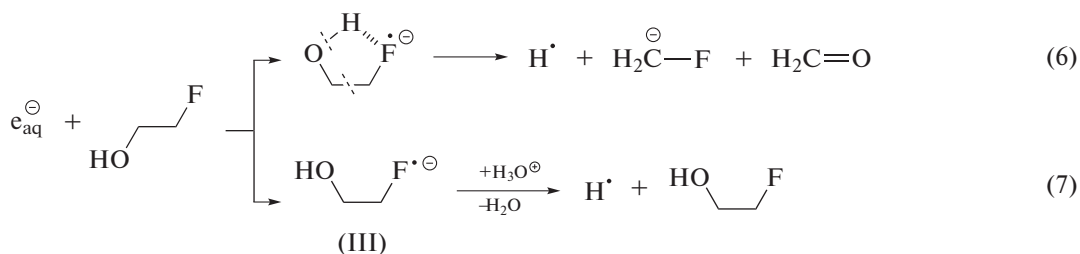


Важно отметить, что введение в раствор акцептора $\cdot\text{OH}$ радикалов приводит лишь к 30%-ному снижению радиационно-химического выхода разложения 2-фторэтанола по сравнению с деаэрированной системой. Следовательно, гидратированные электроны, $\cdot\text{H}$ и радикалы *трет*-бутанола (I) способны взаимодействовать с 2-фторэтанолом, в результате чего происходит расходование исследуемого соединения, но преимущественно без образования фторид-аниона.

В монографии Джагацпаняна [14], посвященной радиационной химии галогенорганических соединений, было указано, что фторорганические соединения акцептируют сольватированные электроны, в результате чего может происходить деструкция их углеродного скелета. Мы не можем исключить возможность реализации такого рода процессов (например, реакции (6)), поскольку при введении в систему *трет*-бутанола радиационно-химический выход формальдегида не изме-

нился по сравнению с деаэрированными растворами. Однако, принимая во внимание значение

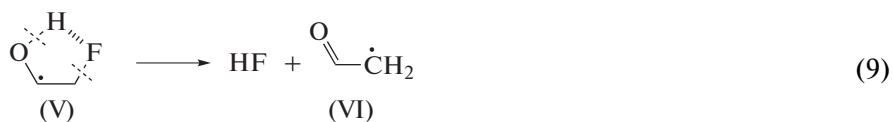
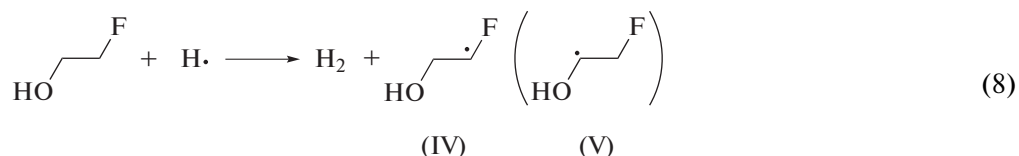
$G(\text{CH}_2\text{O})$, значительно более вероятна нейтрализация анион-радикала(III) с H_3O^+ по реакции (7).



Образующиеся в ходе последней реакции $\cdot\text{H}$ могут взаимодействовать с 2-фторэтанолом с образованием преимущественно α -фторметильных (IV) и, в меньшей степени, α -гидроксиметильных (V) радикалов по реакции (8). Нельзя также исключать возможность реализации аналогичной реакции и с участием радикалов *трет*-бутанола (I).

Поскольку в присутствии *трет*-бутанола не образуется гликолевый альдегид, можно утверждать, что α -фторметильные радикалы (IV) не подвергаются гидролизу в этих экспериментальных условиях. Происходит это из-за низкой скорости гидролиза α -фторметильных радикалов (IV) и восстано-

вительных свойств доминирующих в системе интермедиатов (e_{aq}^- , $\cdot\text{H}$ и радикалов (V)). По нашему мнению, фторид-анионы с небольшим выходом при радиоллизе 2-фторэтанол в присутствии акцептора $\cdot\text{OH}$ радикалов образуются только в результате свободнорадикальной фрагментации радикалов (V) по реакции (9). Ранее было показано, что аналогичного рода реакции приводят к радиационно-индуцированному дегалогенированию различных бром- и хлоргидринов в водных растворах [15].



Последующее восстановление радикалов (VI) будет приводить к образованию ацетальдегида, который регистрируется в качестве конечного молекулярного продукта радиолиза 2-фторэтанол во всех исследованных в работе системах.

В заключение рассмотрения системы необходимо отметить, что относительно невысокие радиационно-химические выходы фторид-аниона при радиоллизе 2-фторэтанол в присутствии *трет*-бутанола также связаны со способностью этого акцептора взаимодействовать с $\cdot\text{H}$ по реакции аналогичной (4), в результате чего уменьшается вероятность реализации реакции (8) с образованием радикалов (V).

Насыщение водных растворов закисью азота приводит при радиоллизе к удвоению выхода $\cdot\text{OH}$ и удалению из системы гидратированных электронов за счет реакции (10). Однако представленные в

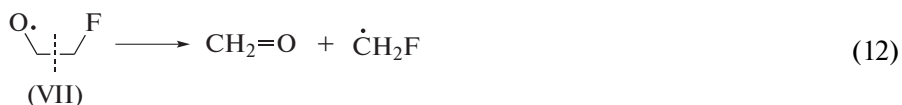
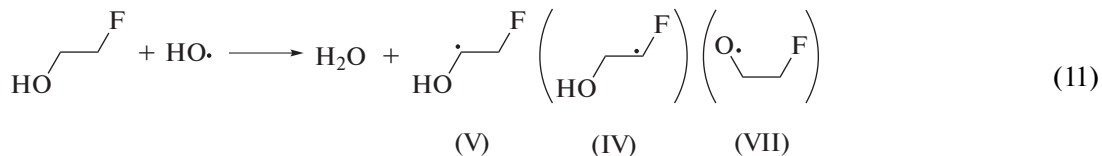
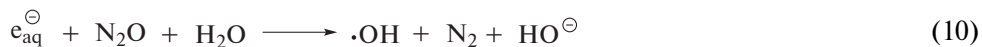
табл. 1 данные свидетельствуют, что при почти двукратном увеличении радиационно-химического выхода разложения 2-фторэтанол в присутствии N_2O по сравнению с деаэрированной системой наблюдается лишь 15%-й прирост радиационно-химического выхода неорганического фторида.

Обнаруженный экспериментальный факт может быть связан со следующими обстоятельствами. Во-первых, в насыщенном аргоном растворе дегалогенирование 2-фторэтанол было вызвано, в том числе, и взаимодействием с гидратированным электроном за счет последовательности уже рассмотренных нами реакций (7)–(9). Поэтому удаление из системы e_{aq}^- приводит к исключению одного из путей образования фторид-аниона. Во-вторых, в силу низкой концентрации 2-фторэтанол часть $\cdot\text{OH}$ в объеме раствора расходована

лась не в радикал-молекулярных реакциях с исследуемым веществом, а в бирадикальных, о чем свидетельствует $G(\text{H}_2\text{O}_2) > G_{\text{H}_2\text{O}_2}$ (табл. 1).

Взаимодействие 2-фторэтанола с $\cdot\text{OH}$ помимо углеродцентрированных радикалов (IV) и (V) будет также приводить к образованию кислород-

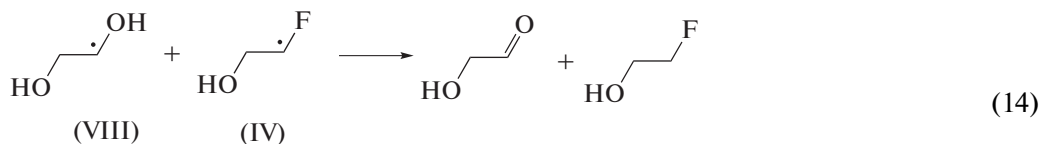
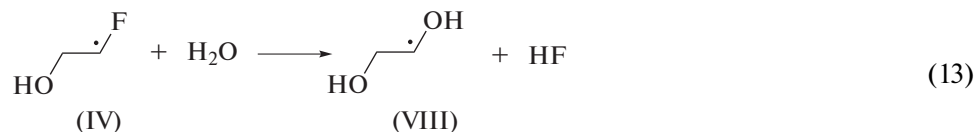
центрированного радикала (VII). Последний подвергается β -фрагментации по реакции (12) с разрывом углерод-углеродной связи, что проявляется в увеличении значения радиационно-химического выхода формальдегида по сравнению с раствором, насыщенным аргоном.



Способные элиминировать фтористый водород по реакции (9) α -гидроксилсодержащие углеродцентрированные радикалы (V) являются основным источником неорганического фторида при радиоллизе 2-фторэтанола в растворе, насыщенном N_2O .

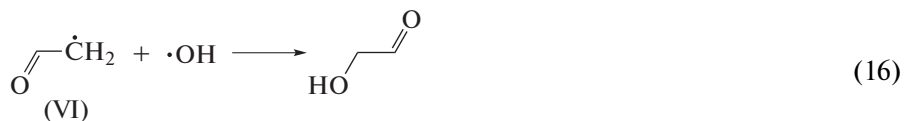
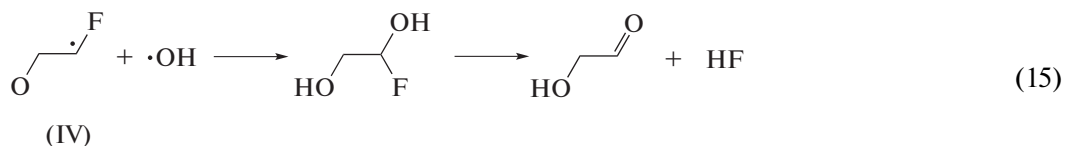
Образование гликолевого альдегида в этих условиях вероятно происходит преимущественно

вследствие гидролиза радикала α -фторметильного типа (IV) по реакции (13). Образующийся в последней реакции радикал этиленгликоля (VIII) может окисляться до гликолевого альдегида в реакциях диспропорционирования с углеродцентрированными радикалами, присутствующими в системе, например, по реакции (14).

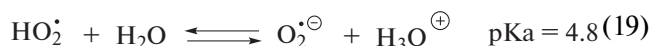
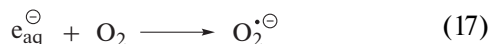


В силу низкой концентрации 2-фторэтанола в растворе нельзя полностью исключить и возможность образования гликолевого альдегида в ре-

зультате рекомбинации $\cdot\text{OH}$ с радикалами α -фторметильного типа (IV), а также ацетальдегида (VI) по следующим реакциям:

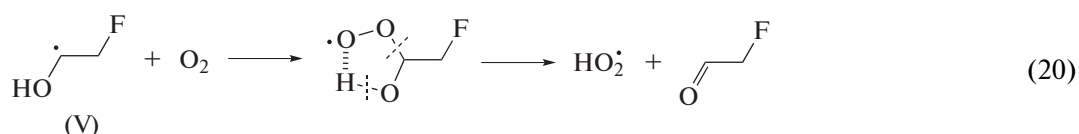


В водных растворах 2-фторэтанола, насыщен-ных кислородом, гидратированные электроны и атомы водорода взаимодействуют с O_2 по реакци-ям (17) и (18), в результате чего эти радикальные продукты радиолита воды количественно превра-щаются при $pH \sim 7$ в $O_2^{\cdot-}$.



Поэтому радиационно-индуцированные пре-вращения 2-фторэтанола в насыщенных кислоро-дом водных растворах происходят вследствие взаи-

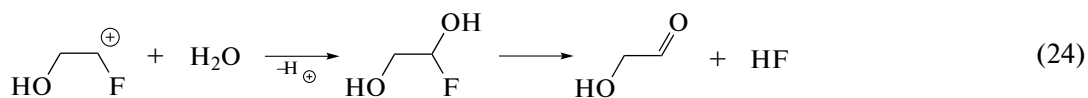
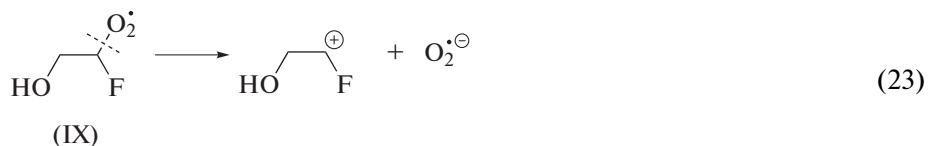
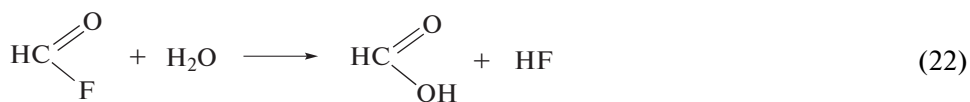
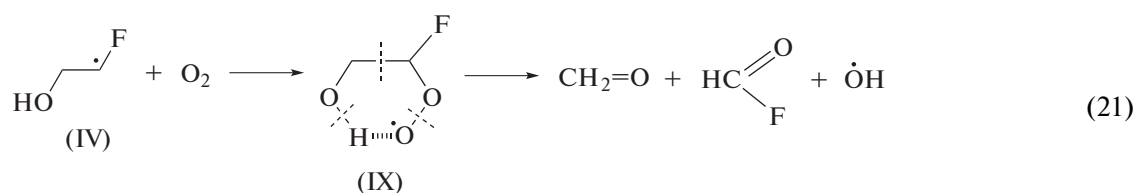
модействия этого фторгидрина с $\cdot OH$ и $O_2^{\cdot-}$ — ради-калами, проявляющими окислительные свойства. Наблюдаемое в этих условиях двукратное снижение радиационно-химического выхода неорганическо-го фторида по сравнению с раствором, насыщен-ным аргоном, может быть отчасти связано с удале-нием из системы $\cdot H$ и, как следствие, невозмож-ностью реализации реакции (8). Однако, лишь незначительное снижение радиационно-химиче-ского выхода разложения 2-фторэтанола, а также кратное уменьшение выхода ацетальдегида свиде-тельствуют о том, что ингибирование дегалогени-рования исследуемого вещества может происходить вследствие окисления кислородом α -гидроксилсо-держащих углеродцентрированных радикалов (V) по следующей реакции



Реализация процесса, аналогичного реакции (20), при хранении РФП “2- $[^{18}F]$ фтордезоксиглюкоза” может быть причиной обнаруженного нами ингибирования его авторадииолитического разложения в присутствии кислорода [7].

К сожалению, нам не удалось идентифициро-вать 2-фторацетальдегид в качестве продукта ра-диолиза 2-фторэтанола, что может быть связано как с ограничениями использованной аналитиче-ской методики, так и высокой реакционной спо-собностью этого галогенсодержащего альдегида в условиях радиолита.

Увеличение радиационно-химических выхо-дов формальдегида и гликолевого альдегида при радиолите насыщенных кислородом растворов 2-фторэтанола происходит вследствие взаимо-действия радикалов α -фторметильного типа (IV) с кислородом. Реакцию аналогичную (21) ранее наблюдали при облучении α -диолов в водных растворах, насыщенных кислородом [15]. Элими-нирование $O_2^{\cdot-}$ пероксильными радикалами ранее было обнаружено при радиолите дисахаридов в присутствии кислорода [16].



Несмотря на образование дополнительных количеств неорганического фторида в реакциях (22) и (24), его радиационно-химический выход в окиснированных растворах 2-фторэтанола снижается примерно в 2 раза по сравнению с деаэрированными. Это указывает на высокую эффективность ингибирования кислородом свободнорадикального дегалогенирования 2-фторэтанола (реакция (9)) за счет окисления его α -гидроксилсодержащих углерод-центрированных радикалов (V) по реакции (20).

Представленные в работе значения радиационно-химических выходов фторид-аниона при радиоллизе исследуемого вещества в различных условиях позволяют оценить константу скорости монарадикального дегалогенирования (реакция (9)) 2-фторэтанола. Если принять допущение, что неорганический фторид образуется только из α -гидроксилсодержащих углеродцентрированных радикалов (V), то наблюдаемое в присутствии кислорода 50% ингибирование элиминирования фторид-аниона будет свидетельствовать о равенстве скоростей реакций окисления радикала (V) кислородом по реакции (20) и монарадикального дегалогенирования этого радикала по реакции (9)

$$k_2 \times [R\cdot] \times [O_2] = k_1 \times [R\cdot] \quad (25)$$

Тогда, с учетом концентрации кислорода в растворе 1.22×10^{-3} моль/л [17] и константы присоединения кислорода к радикалу (V) равной 3.2×10^9 л \times моль $^{-1}$ \times с $^{-1}$ (взята константа взаимодействия O_2 с радикалом этиленгликоля (VIII) из работы [18]) константа скорости монарадикального дегалогенирования 2-фторэтанола составит

$$k_1 = k_2 \times [O_2] = 3.904 \times 10^6 \text{ с}^{-1} \quad (26)$$

Полученная величина более чем на 4 порядка превосходит константу скорости дегидратации радикалов этиленгликоля (VIII) и примерно равна константе скорости реакции дефосфорилирования радикала лизофосфохолина ($3.5 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$ [19]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом стационарного радиоллиза изучен механизм и конечные молекулярные продукты радиационно-индуцированных превращений 2-фторэтанола в разбавленных водных растворах как модель авторадилитического дегалогенирования радиофармпрепарата “2- ^{18}F фтордезоксиглюкоза”. Разработана реагентно-хроматографическая методика определения фторид-аниона на фоне фторорганических соединений. Установлено, что дегалогенирование 2-фторэтанола в водных растворах происходит вследствие его взаимодействия

с $OH\cdot$ и $H\cdot$. При этом присоединение e_{aq}^- не приводит к элиминированию фторида, что отличает радиационную химию 2-фторэтанола от гидроксилсодержащих хлор- и броморганических соединений. Показано, что основным механизмом радиационно-индуцированного дегалогенирования 2-фторэтанола в водных растворах является свободнорадикальная фрагментация его гидроксилсодержащего углеродцентрированного радикала, сопровождающаяся разрывом двух σ -связей в β -положении к радикальному центру. За счет окисления гидроксилсодержащего углеродцентрированного радикала 2-фторэтанола кислород снижает радиационно-химический выход неорганического фторида примерно в 2 раза. Рассчитанная величина константы скорости реакции монарадикального дегалогенирования 2-фторэтанола составила $3.9 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trojanowicz M., Bartosiewicz I., Bojanowska-Czajka A., Kulisa K., Szreder T., Bobrowski K., Nichiporc H., Garcia-Reyes J.F., Natęcz-Jaweckie G., Męczyńska-Wielgosz S., Kisała J. // *Chemical Engineering J.* 2019. V. 357. P. 698.
2. Scott P.J., Hockley B.G., Kung H.F., Manchanda R., Zhang W., Kilbourn M.R. // *Applied Radiation and Isotopes.* 2009. V. 67. № 1. P. 88.
3. Бринкевич С.Д., Суконко О.Г., Чиж Г.В., Полойко Ю.Ф. // *Медико-биологические проблемы жизнедеятельности.* 2014. № 11. С. 151.
4. Бринкевич С.Д., Тугай О.В., Невзоров Д.И. // *Химия высоких энергий.* 2019. Т. 53. № 4. С. 294.
5. Brinkevich S., Pires L.P., Portilho F.L., Santos-Oliveira R. // *Current Radiopharmaceuticals.* 2018. V. 11. P. 69.
6. Walters L.R., Martin K.J., Jacobson M.S., Hung J.C., Mosman E.A. // *J. Nuclear Medicine Technology.* 2012. V. 40. № 1. P. 52.
7. Бринкевич С.Д., Тугай О.В. // *Химия высоких энергий.* 2020. Т. 54. № 1. С. 60.
8. Jozsai I., Svidro M., Pótári N. // *Applied Radiation and Isotopes* 2019. V. 146. P. 78.
9. Búriová E., Macásek F., Melichar F., Kropá M., Procházka L. // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2005. V. 264. № 3. P. 595.
10. Бринкевич С.Д., Шадыро О.И. // *Химия высоких энергий.* 2018. Т. 52. № 4. С. 347.
11. Sarathchandraprakash N.K., Balaji J., Manral K. // *International J. Innovative Research in Science, Engineering and Technology.* 2014. V. 3. № 12. P. 18269.
12. Бринкевич С.Д., Кузьмук Д.А., Свердлов Р.Л., Шадыро О.И. // *Химия высоких энергий.* 2019. Т. 53. № 6. С. 478.
13. Бринкевич С.Д., Шадыро О.И. // *Химия высоких энергий.* 2009. Т. 43. № 6. С. 491.

14. *Джагацпаян Р.В., Филиппов М.Т.* // Радиационная химия галогенсодержащих органических соединений. М.: Атомиздат, 1973. 271 с.
15. *Петряев Е.П., Шадыро О.И.* // Радиационная химия бифункциональных органических соединений. Минск: Университетское, 1986. 165 с.
16. *Edimecheva I.P., Kisel R.M., Shadyro O.I., Kazem K., Murase H., Kagiya T.* // J. Radiat. Res. 2005. V. 46. № 3. P. 319.
17. *Xing W., Yin M., Lv Q., Hu Y., Liu, C., Zhang J.* // Oxygen solubility, diffusion coefficient and solution viscosity. (Chapter in) Rotating Electrode Methods and Oxygen Reduction Electrocatalysts. Elsevier, 2014. P. 1.
18. *Adams G.E., Willson R.L.* // Trans. Faraday Soc. 1969. V. 65. P. 2981.
19. *Müller S.N., Batra R., Senn M., Giese B., Kisel M., Shadyro O.* // J. American Chemical Society. 1997. V. 119. № 12. P. 2795.