



New Approach to Lowering of Radiation Affects Risks During Spaceflights in System Earth - Moon

**Yu.E.Sinyak, D.V.Rakov,
B.S.Fedorenko**

Institute for Biomedical Problems

76, Choroshevskoe sh., Moscow, Russia

e-mail: sinyak@imbp.ru



ВВЕДЕНИЕ

Как показывает анализ радиационной обстановки при полете к Луне или Марсу, полеты будут проходить в условиях повышенных радиационных воздействий на экипаж. Основным источником радиационной опасности при этом являются галактические космические лучи (ГКЛ), представляющие собой поток протонов высоких энергий (80%), альфа – частиц (13%) и более тяжелых ядер.

Большую опасность могут представлять солнечные космические лучи во время солнечных вспышек (СКЛ). В состав (СКЛ) входят электроны, протоны, альфа – частицы и более тяжелые ядра.

Дополнительный источник радиационной опасности может представлять ядерный двигатель в случае его использования. На поверхности Луны и Марса космонавты могут подвергаться ГКЛ и СКЛ, поскольку у Марса и Луны отсутствуют радиационные пояса.

Ионизирующие излучения могут вызывать различные изменения в организме человека, включая онкологические новообразования.

Поиск методов снижения радиационной опасности является одним из важнейших факторов успешной реализации программы длительного межпланетного полета. Одним из таких методов может служить использование экипажем питьевой воды с пониженными концентрациями стабильного изотопа водорода – дейтерия и стабильных изотопов кислорода $^{17}\text{O}_2$, $^{18}\text{O}_2$, которая может быть получена в регенерационных системах жизнеобеспечения.



Проблема получения и использования воды с пониженными концентрациями тяжелых стабильных изотопов водорода (дейтерия) и кислорода (^{17}O , ^{18}O) является частью общей проблемы: «Создание и поддержание оптимального изотопного состава биогенных химических элементов, входящих в состав растений, животных, человека и окружающей среды».

Изотопы - химические элементы, имеющие в ядре одинаковое число протонов, но различное количество нейтронов. Большинство химических элементов, входящих в состав растений, животных, человека и среды обитания имеют стабильные изотопы.

Несмотря на идентичность электронных оболочек, стабильные изотопы некоторых биогенных химических элементов (напр. H_2 , O_2 , C) проявляют различные биохимические, биофизические и медико-биологические свойства. При этом показано, что тяжелые изотопы этих элементов являются либо токсичными для растительного и животного организма, либо менее привлекательными для реакций метаболизма. Наибольшие отличия в медико-биологических свойствах проявляют стабильные изотопы водорода и кислорода, входящие в состав воды.



Таблица 1. Изотопные характеристики биогенных химических элементов

№ пп	Элементы и стабильные изотопы	Кол-во протонов и нейтронов в ядре, p/n	Относительная распространенность изотопов в природе %	Кол-во стабильных изотопов	№ пп	Элементы и стабильные изотопы	Кол-во протонов и нейтронов в ядре, p/n	Относительная распространенность изотопов в природе %	Кол-во стабильных изотопов
1	Водород ¹ H ₁ -протий ² D ₁ - дейтерий	1/0 1/1	99,985 0,015	2	8	Сера ³² S ₁₆ ³³ S ₁₆ ³⁴ S ₁₆ ³⁶ S ₁₆	16/16 16/17 16/18 16/20	95,02 0,75 4,21 0,02	4
2	Бор ¹⁰ B ₅ ¹¹ B ₅	5/5 5/6	19,9 80,1	2	9	Хлор ³⁵ Cl ₁₇ ³⁷ Cl ₁₇	17/18 17/20	75,77 24,23	2
3	Углерод ¹² C ₆ ¹³ C ₆	6/6 6/7	98,90 1,10	2	10	Калий ³⁹ K ₁₉ ⁴⁰ K ₁₉ ⁴¹ K ₁₉	19/20 19/21 19/22	93,25 0,01 6,73	3
4	Азот ¹⁴ N ₇ ¹⁵ N ₇	7/7 7/8	99,63 0,37	2	11	Кальций ⁴⁰ Ca ₂₀ ⁴² Ca ₂₀ ⁴³ Ca ₂₀ ⁴⁴ Ca ₂₀ ⁴⁶ Ca ₂₀ ⁴⁸ Ca ₂₀	20/20 20/22 20/23 20/24 20/26 20/28	96,94 0,64 0,13 2,08 0,004 0,18	6
5	Кислород ¹⁶ O ₈ ¹⁷ O ₈ ¹⁸ O ₈	8/8 8/9 8/10	99,76 0,04 0,20	3	12	Ванадий ⁵⁰ V ₂₃ ⁵¹ V ₂₃	23/27 23/28	0,25 99,75	2
6	Магний ²⁴ Mg ₁₂ ²⁵ Mg ₁₂ ²⁶ Mg ₁₂	12/12 12/13 12/14	78,99 10,00 11,01	3	13	Хром ⁵⁰ Cr ₂₄ ⁵² Cr ₂₄ ⁵³ Cr ₂₄ ⁵⁴ Cr ₂₄	24/26 24/28 24/29 24/30	4,35 83,75 9,50 2,36	4
7	Кремний ²⁸ Si ₁₄ ²⁹ Si ₁₄ ³⁰ Si ₁₄	14/14 14/15 14/16	92,23 4,67 3,10	3	14	Железо ⁵⁴ Fe ₂₆ ⁵⁶ Fe ₂₆ ⁵⁷ Fe ₂₆ ⁵⁸ Fe ₂₆	26/28 26/30 26/37 26/32	5,82 91,18 2,10 0,28	4



Изотопные характеристики биогенных химических элементов (продолжение)

№ пп	Элементы и стабильные изотопы	Кол-во протонов и нейтронов в ядре, p/n	Относительная распространен ность изотопов в природе %	Кол-во стабиль ных изотопо в	№ пп	Элементы и стабильные изотопы	Кол-во протонов и нейтронов в ядре, p/n	Относительная распространен ность изотопов в природе %	Кол-во стабильных изотопов
15	Никель ⁵⁸ Ni ₂₈ ⁶⁰ Ni ₂₈ ⁶¹ Ni ₂₈ ⁶² Ni ₂₈ ⁶⁴ Ni ₂₈	28/30 28/32 28/33 28/34 28/36	68,27 26,10 1,13 3,59 0,91	5	18	Селен ⁷⁴ Se ₃₄ ⁷⁶ Se ₃₄ ⁷⁷ Se ₃₄ ⁷⁸ Se ₃₄ ⁸⁰ Se ₃₄ ⁸² Se ₃₄	34/40 34/42 34/43 34/44 34/46 34/48	0,90 9,20 7,60 23,70 49,80 8,80	6
16	Медь ⁶³ Cu ₂₉ ⁶⁵ Cu ₂₉	29/34 29/36	69,17 30,83	2	19	Бром ⁷⁹ Br ₃₅ ⁸¹ Br ₃₅	35/44 35/46	50,69 49,31	2
17	Цинк ⁶⁴ Zn ₃₀ ⁶⁶ Zn ₃₀ ⁶⁷ Zn ₃₀ ⁶⁸ Zn ₃₀ ⁷⁰ Zn ₃₀	30/34 30/36 30/37 30/38 30/40	48,60 27,9 4,10 18,80 0,60	5	20	Молибден ⁴² Mo ₉₂ ⁴² Mo ₉₄ ⁴² Mo ₉₅ ⁴² Mo ₉₆ ⁴² Mo ₉₇ ⁴² Mo ₉₈ ⁴² Mo ₁₀₀	42/50 42/52 42/53 42/54 42/55 42/56 42/58	14,80 9,20 15,90 16,60 9,50 24,10 9,60	7



ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ПРИРОДНОЙ ВОДЫ

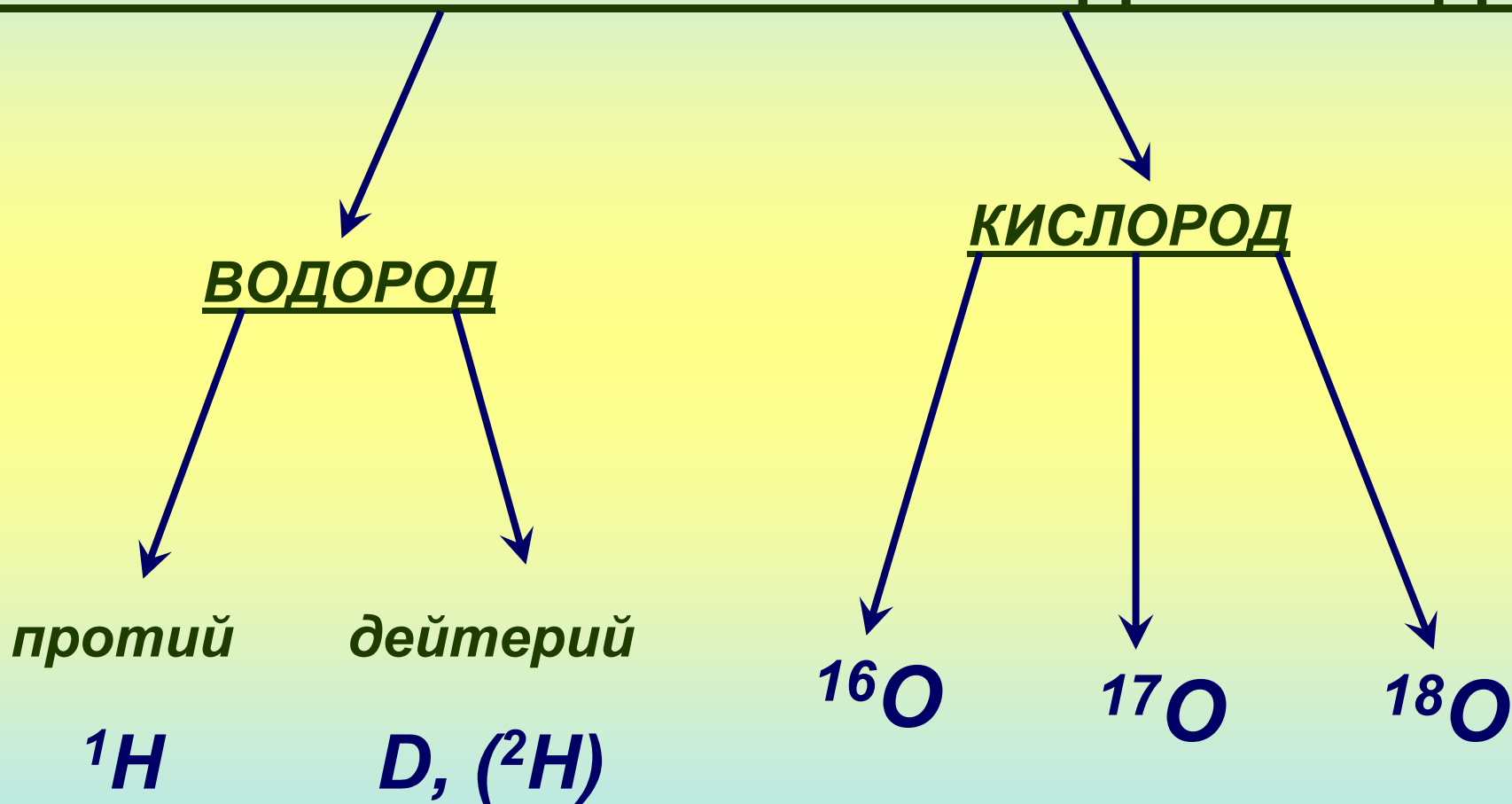




Таблица 2. Изотопные модификации природной воды

N п/п	H ₂ O	N п/п	HDO	N п/п	D ₂ O
1	$^1\text{H}_2^{16}\text{O}$	4	$^1\text{H}_2\text{D}^{16}\text{O}$	7	$^1\text{D}_2^{16}\text{O}$
2	$^1\text{H}_2^{17}\text{O}$	5	$^1\text{H}_2\text{D}^{17}\text{O}$	8	$^1\text{D}_2^{17}\text{O}$
3	$^1\text{H}_2^{18}\text{O}$	6	$^1\text{H}_2\text{D}^{18}\text{O}$	9	$^1\text{D}_2^{18}\text{O}$



Таблица 3. Биологические свойства тяжелой по водороду (D_2O) воды.

№	исследуемый объект	концентрация D_2O , %	ЭФФЕКТ
1	одноклеточные водоросли (сценедесмус)	38,5	прекращение роста и развития
2	высшие растения (подсолнух и пшеница)	100 (полив)	семена не прорастают
3	низшие животные -парамеции -плоские черви	92 90	-гибель через 48 часов -потеря активности через 2 часа, гибель через 3 недели
4	высшие животные МЫШИ	99,5 (введение D_2O парантерально)	гибель на 5-й день



Таблица 4. Морфометрические характеристики растений арабидопсиса, выращенных при поливе водой с различной концентрацией дейтерия (в пересчете на одно растение, n = 40)

№ п/п	Морфометрические характеристики	Варианты использованной воды		
		бездейтериевая вода $\delta D = - 815 \text{ ‰}$	контроль (дистиллированная вода) $\delta D = - 72 \text{ ‰}$	вода с повышенным содержанием дейтерия $\delta D = + 355 \text{ ‰}$
1	Масса сухого вещества наземной части, г	0,06	0,01	0,006
2	Число побегов, шт.	$2,37 \pm 0,93$	$1,35 \pm 0,66$	$1,00 \pm 0,00$
3	Число листьев в розетке, шт.	$6,2 \pm 0,2$	$5,3 \pm 0,1$	$4,8 \pm 0,3$
4	Высота растения, см	$20,5 \pm 4,4$	$18,9 \pm 1,7$	$19,2 \pm 2,2$
5	Длина стручка, мм	$11,2 \pm 1,5$	$8,3 \pm 0,9$	$6,2 \pm 1,1$
6	Количество стручков, шт.	$11,5 \pm 2,5$	$6,8 \pm 0,9$	$5,3 \pm 1,3$
7	Количество семян в стручке, шт.	$28,0 \pm 6,3$	$20,7 \pm 2,3$	$17,9 \pm 5,1$
8	Общая семенная продукция одного растения, шт.	322	141	95



Возможные причины проявления биохимических и биофизических различий стабильных изотопов биогенных химических элементов вообще и протия и дейтерия в частности

- ***разница в массах реагирующих соединений,***
- ***величина ядерного спина,***
- ***меньшая прочность химической связи в молекулах с легкими изотопами по сравнению с молекулами, в состав которых входят тяжелые изотопы,***
- ***разница в размерах атома или молекулы, содержащих легкие или тяжелые изотопы,***
- ***изменение прочности водородной связи между молекулами, в которые входят водород, кислород, азот, углерод и т.д,***
- ***разница в запасе свободной энергии (соединения, имеющие в своем составе тяжелый изотоп, обладают меньшим запасом свободной энергии по сравнению с изотопно облегченной формой того же соединения).***



**Таблица 5. Результаты исследований влияния
бездейтериевой воды на общий вес и внутренние органы
японского перепела**

№ п/п	ПОКАЗАТЕЛИ (г)	Бездейтериевая вода	Контроль
1	ВЕС ПТИЦЫ	96,1	68,9
2	ВЕС КРОВИ	4,0	2,7
3	ВЕС СЕРДЦА	0,92	0,51
4	ВЕС МУСКУЛЬНОГО ЖЕЛУДКА	2,45	2,05
5	ВЕС ЖЕЛЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ	0,44	0,48
6	ВЕС СЕЛЕЗЕНКИ	0,03	0,03
7	ВЕС ГОНАД	1,76	0,03
8	ВЕС ПЕЧЕНИ	2,26	2,14
9	ВЕС НАДПОЧЕЧНИКОВ	0,02	0,007



Исследование радиопротекторных свойств воды с измененным изотопным составом

Исследования, проведенные в ГНЦ РФ-ИМБП РАН совместно с НИИ канцерогенеза РОНЦ им. Н.Н.Блохина РАМН, показали, что

➤ у мышей линии *Valb/c*, облученных дозой 1000 рад и употреблявших бездейтериевую воду наблюдалось:

- увеличение продолжительности жизни
- менее резкое снижение массы тела по сравнению с контрольными животными
- увеличение массы печени по сравнению с контрольными животными

➤ у мышей линии *Valb/c*, облученных дозой 550 рад и употреблявших бездейтериевую воду наблюдалось:

- увеличение продолжительности жизни
- увеличение массы тимуса по сравнению с контрольными животными
- снижение процента гибели по сравнению с контрольной группой



ВЛИЯНИЕ ВОДЫ С ИЗМЕНЕННЫМ ИЗОТОПНЫМ СОСТАВОМ НА РАЗВИТИЕ ЛУЧЕВЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ У ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЖИВОТНЫХ

- **Целью работы являлось:** выяснить возможности снижения риска радиационных нарушений в организме млекопитающих при действии низких доз гамма – излучения в условиях многократного облучения и длительного применения воды с пониженным содержанием дейтерия и кислорода в условиях космического полета
- **Задачи исследования** предусматривали проведение экспериментов с длительным использованием животными воды с пониженным содержанием тяжелого стабильного изотопа водорода - дейтерия и кислорода (^{18}O).
- В эксперименте использованы взрослые мыши – самцы линии BALB/c. Животных подвергали облучению на установке РХ – γ – 30 с источником облучения ^{60}Co мощностью 0,32 сГр/мин двукратно в суммарной дозе 0,25 Гр, 4-х кратно в суммарной дозе 0,5 Гр (по 0,125 Гр в сутки). Учитывали изменения в массе тела, иммунных органов (тимуса и селезенки), а также их цитологическое строение, количество лейкоцитов в периферической крови и количество клеток костного мозга.



РЕЗУЛЬТАТЫ

- Длительное употребление воды с пониженным содержанием дейтерия и кислорода (^{18}O) приводит к снижению степени лучевых повреждений, обусловленных действием гамма – излучением в низких дозах в условиях повторного воздействия
- Результаты изучения структуры иммунных органов (тимуса и селезенки) показывают, что механизмы адаптивного эффекта могут быть обусловлены повышением общей резистентности организма экспериментальных животных
- Полученные результаты позволяют рекомендовать воду с пониженным содержанием дейтерия и кислорода (^{18}O) для снижения возможных радиационных последствий у космонавтов.



Исследования противоопухолевых свойств воды с измененным изотопным составом

ОПЫТ сутки	Объем опухоли (см ³) / сутки после перевивки опухоли							
	6	11	15	20	27	34	38	41
Опыт 1 (D<)	0,0004 ± 0,0002	0,33 ± 0,07	0,96 ± 0,16	4,11 ± 0,89	13,35 ± 2,50	23,39 ± 4,55	31,71 ± 5,83	35,36 ± 7,31
Опыт 2 (D, ¹⁸ O<)	0,0005 ± 0,0002	0,21 ± 0,04	1,17 ± 0,21	5,38 ± 0,75	16,71 ± 1,74	31,95 ± 3,34	38,45 ± 4,11	39,93 ± 8,72
Контроль	0,01 ± 0,003	0,80 ± 0,14	2,75 ± 0,38	8,74 ± 1,38	22,37 ± 2,28	40,15 ± 3,19	50,62 ± 4,79	58,43 ± 5,31
P ₁	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,05	< 0,05
P ₂	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05
P ₃	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Торможение, % Опыт 1	96	59	65	53	40	42	37	39
Торможение, % Опыт 2	95	74	57	38	25	20	24	32



Анализ данных, полученных в экспериментах на перевиваемых опухолях: карцинома легких Льюис и рак шейки матки РШМ-5 показал, что вода с пониженным содержанием дейтерия и вода с пониженным содержанием дейтерия и кислорода ^{18}O оказывает достоверное тормозящее воздействие на объем всех исследованных опухолей, достоверно увеличивает время появления первых узелков на месте перевивки, достоверно снижает массу метастазов в легкие у животных с перевиваемой карциномой Льюис, достоверно увеличивает продолжительность жизни экспериментальных животных на 33% с перевиваемой опухолью РШМ-5.



ВЫВОДЫ

- **В работах ИМБП показано, что легкоизотопная вода обладает биологической активностью, при этом**
 - ✓ **возрастает семенная продукция высших растений,**
 - ✓ **возрастает репродуктивная функция высших животных (перепелов)**
- **Легкоизотопная вода проявляет**
 - ✓ **радиопротекторные свойства**
 - ✓ **противоопухолевые свойства**