

## ИЗВЛЕЧЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ИЗОТОПОВ ДЕЙТЕРИЯ, ТРИТИЯ И КИСЛОРОДА ИЗ ВОДЫ

О.В. Мосин<sup>1</sup>, И. Игнатов<sup>2</sup>

1 – ФГБОУ ВПО “Московский государственный университет прикладной биотехнологии”,  
Москва, Россия

e-mail: [mosin-oleg@yandex.ru](mailto:mosin-oleg@yandex.ru)

2 – Научно-исследовательский центр медицинской биофизики, София, Болгария

*В данной статье рассмотрены теоретические и научно-практические вопросы очистки питьевой воды от тяжелых изотопов – D, T и <sup>18</sup>O. Проведены собственные исследования авторов изотопных эффектов дейтерия в клетках различных биологических объектов микробного, растительного и животного происхождения, в результате сделан вывод о комплексном многофакторном воздействии дейтерия на организм. Даны конструкции аппаратов, позволяющих получать воду со сниженным на 5–30% содержанием дейтерия. Приведены собственные и имеющиеся в научной литературе данные по положительному влиянию воды со сниженным содержанием дейтерия на организм.*

*Ключевые слова: дейтерий, тритий, кислород–18, “тяжелая” вода, “легкая” вода.*

### Введение

Важным показателем качества потребляемой питьевой воды является её изотопный состав. Природная вода на 99,7 мол.% состоит из воды химической формулы H<sub>2</sub><sup>16</sup>O, молекулы которой образованы природными атомами водорода <sup>1</sup>H и кислорода <sup>16</sup>O. Оставшиеся 0,3 мол.% представлены т. н. изотопологами – изотопными разновидностями молекул воды. В качестве изотопологов в природной воде присутствуют тяжелоокислородная (H<sub>2</sub><sup>17</sup>O и H<sub>2</sub><sup>18</sup>O), тяжёлая (D<sub>2</sub><sup>16</sup>O) и тритиевая (сверхтяжёлая) вода (T<sub>2</sub><sup>16</sup>O), последняя из которых радиоактивна.

Количество природных изотопологов воды, в которых атомы H, D, T, <sup>16</sup>O, <sup>17</sup>O и <sup>18</sup>O находятся в различных комбинациях, составляет 18, в которых 9 комбинаций (H<sub>2</sub><sup>16</sup>O, H<sub>2</sub><sup>17</sup>O, H<sub>2</sub><sup>18</sup>O, HD<sup>16</sup>O, HD<sup>17</sup>O, HD<sup>18</sup>O, D<sub>2</sub><sup>16</sup>O, D<sub>2</sub><sup>17</sup>O, D<sub>2</sub><sup>18</sup>O) составляют нерадиоактивные и 9 радиоактивные (T<sub>2</sub><sup>16</sup>O, T<sub>2</sub><sup>17</sup>O, T<sub>2</sub><sup>18</sup>O, DT<sup>16</sup>O, DT<sup>17</sup>O, DT<sup>18</sup>O, HT<sup>16</sup>O, HT<sup>17</sup>O, HT<sup>18</sup>O) изотопологи воды с участием трития [1]. Эти данные свидетельствуют о том, что в природе возможно существование молекул воды, в которых содержатся любые из трех водородных изотопов (H, D и T) и 3 изотопа кислорода (<sup>16</sup>O, <sup>17</sup>O и <sup>18</sup>O) в любом сочетании. 99,97 мол.% всей воды в гидросфере представлено протиевой (H<sub>2</sub><sup>16</sup>O) водой, доля “тяжелой” (D<sub>2</sub><sup>16</sup>O) воды составляет менее 0,02 мол.%. В среднем в природных водах в 10000 молекул содержится 9973 молекулы H<sub>2</sub><sup>16</sup>O, 3 молекулы HD<sup>16</sup>O, 4 молекулы H<sub>2</sub><sup>17</sup>O, 20 молекул H<sub>2</sub><sup>18</sup>O и около 2 молекул D<sub>2</sub><sup>16</sup>O [2]. Еще реже, чем D<sub>2</sub><sup>16</sup>O, встречаются девять радиоактивных естественных изотопологов воды, содержащих тритий – радиоактивный элемент с периодом полураспада 12,26 лет. Тритий формируется в высоких слоях атмосферы, где протекают природные ядерные реакции бомбардировки атомов азота и кислорода нейтронами космического излучения. В небольших количествах тритиевая (“сверхтяжелая”) вода попадает на Землю в составе осадков. Ежеминутно на каждый 1 см<sup>2</sup> земной поверхности попадают 8–9 атомов трития. T<sub>2</sub><sup>16</sup>O распределена неравномерно: в материковых водоемах ее больше, чем в океанах; в полярных океанских водах - больше, чем в экваториальных [3]. Во всей гидросфере Земли всего насчитывается около 15 кг T<sub>2</sub><sup>16</sup>O.

Тяжёлые разновидности воды по своим физико-химическим свойствам и негативному воздействию на биологические объекты существенно отличаются от обычной воды. Так, D<sub>2</sub><sup>16</sup>O кипит при 101,44 °С, замерзает при 3,82 °С, имеет плотность при 20 °С 1,105 г/см<sup>3</sup>, причём максимум плотности приходится не на 4 °С, как у H<sub>2</sub><sup>16</sup>O, а на 11,2 °С (1,106 г/см<sup>3</sup>).

$T_2^{16}O$  кипит при 104 °С, замерзает при 4,9 °С, имеет плотность 1,33 г/см<sup>3</sup>. Физико-химические свойства  $H_2^{17}O$  и  $H_2^{18}O$  меньше отличаются от свойств  $H_2^{16}O$ , чем  $D_2^{16}O$ . Эти изотопологи воды получают перегонкой природной воды и используют в составе препаратов с меченым кислородом в различных диагностических исследованиях [4].

В силу указанных выше факторов станциям водоочистки и водоподготовки рекомендуется проводить изотопное фракционирование воды, т. е. очищать воду от тяжелых изотопов D, T и  $^{18}O$ . Сейчас научно-исследовательские работы по улучшению изотопного качества потребляемой питьевой воды ведутся во всех странах мира, включая Россию, Болгарию и Украину. Однако, существующие очистительные сооружения и технологии водоподготовки и водоочистки часто не справляются с поставленными задачами по извлечению из воды тяжелых изотопов. Поэтому за последние годы разработаны новые современные перспективные методы и технологии фракционирования и изотопной очистки питьевой воды от тяжелых изотопов D, T и  $^{18}O$ , которые могут найти дальнейшее масштабное практическое применение.

Целью данной работы являлось рассмотрение принципиальной возможности широкомасштабного получения облегченной по дейтерию воды за счет применения различных технологий и установок, а также изучение биологического воздействия воды со сниженным содержанием дейтерия и “тяжелой” воды на организм человека.

### **Изучение изотопных эффектов $D_2^{16}O$ и $H_2^{18}O$**

Исследования проводились на клетках различных прокариотических и эукариотических микроорганизмов, включающих метилотрофные, хемогетеротрофные, фотоорганогетеротрофные бактерии, сине-зеленые водоросли, дрожжи и растения. Для приготовления ростовых сред использовали  $D_2^{16}O$  (99,8 ат.% D) и  $H_2^{18}O$  (99,9 ат.%  $^{18}O$ ) (Российский НИЦ “Изотоп” (Санкт-Петербург, РФ) и растворы  $D_2^{16}O$  с  $H_2^{16}O$  изотопного состава  $HD^{16}O$  различных концентраций, содержащих ступенчато-увеличивающиеся концентрации дейтерия. Неорганические соли предварительно перекристаллизовывали в  $D_2^{16}O$ ,  $D_2^{16}O$  дистиллировали над  $KMnO_4$  с последующим контролем изотопной чистоты  $^1H$  ЯМР-спектроскопией на приборе Bruker WM-250 (“Bruker Daltonics”, ФРГ) (рабочая частота 70 МГц, внутренний стандарт  $Me_4Si$ ). Адаптацию к дейтерию проводили рассевом до отдельных колоний и последующей селекцией на твердых (2 %-ный агар) питательных средах (в зависимости от природы исследуемых биологических объектов и потребности в углероде) со ступенчато увеличивающимся градиентом концентрации  $D_2^{16}O$  (от 0; 24,5; 49,0; 73,5 до 98 об.%  $D_2^{16}O$ ). Селекцию выросших в  $D_2^{16}O$  клеток проводили по признаку устойчивости к  $D_2^{16}O$ . За ходом адаптации наблюдали по способности к образованию отдельных колоний на поверхности твердых агаризованных сред с  $D_2^{16}O$ , а также по величине оптической плотности суспензии клеток, измеренной на спектрофотометре Beckman DU-6 (“Beckman Coulter”, США) при  $\lambda=620$  нм.

Как показали наши исследования, биологические объекты очень чувствительно реагируют на изменение изотопного состава воды. При воздействии на них вод различного изотопного состава их реакция изменяется в зависимости от изотопного состава воды. Изотопологи воды различаются друг от друга по физическим свойствам (таблица). Химическое строение молекул изотопологов воды аналогично строению молекул  $H_2^{16}O$ , с очень малым различием в значениях длин ковалентных связей и углов между ними. Однако разница атомных масс изотопов в природной воде велика, поэтому они способны сильно фракционировать в природных процессах:  $D/H \rightarrow 100\%$ ,  $^{18}O/^{16}O \rightarrow 12,5\%$ . Наиболее эффективно изотопы водорода и кислорода фракционируют в процессах испарения-конденсации и кристаллизации воды. Равновесное давление паров у изотопологов воды существенно различается. При этом, чем меньше масса молекулы воды, тем выше давление пара, поэтому пар, равновесный с водой, обогащён лёгкими изотопами водорода  $^1H$  и кислорода  $^{16}O$ , что позволяет осуществлять изотопное фракционирование воды.

Таблица. Изменение физических свойств воды при изотопном замещении

Физические свойства	H <sub>2</sub> <sup>16</sup> O	D <sub>2</sub> <sup>16</sup> O	H <sub>2</sub> <sup>18</sup> O
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	0,997	1,105	1,111
Температура максимальной плотности, °С	3,98	11,24	4,30
Температура плавления при 1 атм., °С	0	3,81	0,28
Температура кипения при 1 атм., °С	100,00	101,42	100,14
Давление пара при 100 °С, мм рт. ст.	760,00	721,60	758,10
Вязкость при 20 °С, мПа·сек	1,002	1,47	1,056

В ряду стабильных изотопов <sup>17</sup>O, <sup>18</sup>O и D самые большие изотопные эффекты в разнице констант скоростей химических реакций с соотношением  $k_h/k_d = 7-10$  наблюдаются в “тяжёлой” воде для C–H/C–D, N–H/N–D и <sup>16</sup>O–H/<sup>16</sup>O–D связей [8]. Поэтому изотопные эффекты в биологических объектах, в основном, определяются дейтерием. В смесях “тяжёлой” воды с обычной водой с большой скоростью происходит изотопный обмен с образованием “полутяжелой” воды (HD<sup>16</sup>O): H<sub>2</sub><sup>16</sup>O + D<sub>2</sub><sup>16</sup>O = 2HD<sup>16</sup>O. Поэтому дейтерий при малом содержании присутствует в воде почти полностью в форме HD<sup>16</sup>O, а при высоком – в форме D<sub>2</sub><sup>16</sup>O. Вышеназванные факторы, а также большая структурированность, плотность и вязкость D<sub>2</sub><sup>16</sup>O по сравнению с обычной водой приводят к изменению скоростей (замедлению) и специфичности ферментативных реакций в “тяжёлой” воде [5]. Однако, существуют и такие реакции, скорость которых в D<sub>2</sub><sup>16</sup>O выше, чем в H<sub>2</sub><sup>16</sup>O. В основном это реакции, катализируемые ионами D<sup>+</sup> или H<sup>+</sup> или <sup>16</sup>OD<sup>-</sup> и <sup>16</sup>OH<sup>-</sup>.

При попадании клетки в D<sub>2</sub><sup>16</sup>O из неё не только удаляется протонированная вода за счет реакции обмена H<sub>2</sub><sup>16</sup>O–D<sub>2</sub><sup>16</sup>O, но и происходит быстрый изотопный (H–D) обмен в гидроксильных (-OH), сульфгидрильных (-SH) и аминогруппах (-NH<sub>2</sub>) всех органических соединений, включая белки, нуклеиновые кислоты, углеводы и жирные кислоты. Известно, что в этих условиях только ковалентная C–H связь не подвергается изотопному обмену и вследствие этого только соединения со связями типа C–D могут синтезироваться de novo [6]. В зависимости от того, какое положение занимает атом дейтерия в молекуле, различают первичные и вторичные изотопные эффекты дейтерия, опосредованные межмолекулярными взаимодействиями. В этом аспекте наиболее важными для структуры макромолекулы являются динамические короткоживущие водородные (дейтериевые) связи. Они формируются между соседними атомами дейтерия (водорода) и гетероатомами кислорода, углерода, азота, серы и “тяжелой” водой из окружающей среды и играют главную роль в поддержании пространственной структуры макромолекул и в межмолекулярных взаимодействиях.

Другое важное свойство определяется пространственной структурой “тяжёлой” воды, имеющей тенденцию сближать гидрофобные группы макромолекул, чтобы минимизировать их эффект на водородную (дейтериевую) связь в присутствии молекул “тяжёлой” воды. Поэтому структура макромолекул белков и нуклеиновых кислот в присутствии D<sub>2</sub><sup>16</sup>O стабилизируется [7].

Полученные нами экспериментальные данные свидетельствуют о том, что клетка реализует особые адаптивные механизмы, способствующие функциональной реорганизации работы жизненно-важных систем в “тяжёлой” воде. Так, например, нормальному синтезу и функционированию в “тяжёлой” воде таких важных соединений, как нуклеиновые кислоты и белки способствует поддержание их структуры посредством формирования водородных (дейтериевых) связей в молекулах. Связи, сформированные атомами дейтерия, различаются по прочности и энергии от аналогичных водородных связей. Большая прочность связи D–<sup>16</sup>O, по сравнению с H–<sup>16</sup>O, обуславливает различия в кинетике реакций D<sub>2</sub><sup>16</sup>O и H<sub>2</sub><sup>16</sup>O. По теории абсолютных скоростей разрыв C–H-связей может происходить быстрее, чем C–D-связей, подвижность ионов D<sub>3</sub><sup>16</sup>O<sup>+</sup> на 28,5% ниже H<sub>3</sub><sup>16</sup>O<sup>+</sup>, а <sup>16</sup>OD<sup>-</sup> – на 39,8% ниже <sup>16</sup>OH<sup>-</sup>, константа ионизации D<sub>2</sub><sup>16</sup>O меньше константы ионизации H<sub>2</sub><sup>16</sup>O [8]. Эти эффекты

отражаются на химической кинетике и скорости химических реакций в  $D_2^{16}O$ . Протеолитические реакции и биохимические процессы в  $D_2^{16}O$  значительно замедлены.

Эффекты  $D_2^{16}O$  определяются концентрациями дейтерия. В природных водах содержание дейтерия распределено неравномерно: от 0,02–0,03 мол.% для речной и морской воды, до 0,015 мол.% для воды из Антарктического льда, – наиболее “обедненной” по дейтерию природной воды с содержанием дейтерия в 1,5 раза меньшим, чем в морской воде. По международному стандарту SMOW, соответствующему глубинной воде Мирового океана, которая весьма стабильна по изотопному составу, абсолютное содержание D и  $^{18}O$  (изотопные сдвиги) в океанической воде составляет:  $D/^{1}H = (155,76 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$  (155,76 ppm),  $^{18}O/^{16}O = (2005,20 \pm 0,45) \cdot 10^{-6}$  (2005 ppm) [9]. Для международного стандарта природной воды из Антарктики SLAP изотопные сдвиги составляют: для пары  $D/H = 89 \cdot 10^{-6}$  (89 ppm), для пары  $^{18}O/^{16}O = 1894 \cdot 10^{-6}$  (1894 ppm). Содержание самого лёгкого изотополога  $H_2^{16}O$  в воде, соответствующей по изотопному составу SMOW, составляет 997,0325 г/кг (99,73 мол.%), а по изотопному составу SLAP – 997,3179 г/кг (99,76 мол.%). Для природных вод СНГ чаще всего характерны отрицательные отклонения от SMOW на  $(1,0–1,5) \cdot 10^{-5}$ , в отдельных случаях до  $(6,0–6,7) \cdot 10^{-5}$ , но встречаются и положительные отклонения до  $2,0 \cdot 10^{-5}$ .

Талая снеговая и ледниковая воды в горных регионах Болгарии содержат на 3-5% меньше дейтерия, чем обычная питьевая вода. В 1 тонне речной воды в среднем содержится 150–200 г дейтерия в форме  $HD^{16}O$ . Согласно теоретическим расчетам, в организм человека на протяжении всей жизни поступает около 80 тонн воды, содержащей в своем составе 10–12 кг дейтерия и значительные количества коррелирующих с ним изотопов T и  $^{18}O$ . Такое значительное количество тяжелых изотопов в составе питьевой воды способно к наступлению половой зрелости человека повредить его гены и привести к развитию онкологических заболеваний, а также инициировать старение организма. Как показали наши исследования, “тяжёлая” вода высокой концентрации токсична для организма; химические реакции в её среде проходят медленнее, по сравнению с обычной водой, водородные связи с участием дейтерия несколько сильнее обычных водородных связей [10]. Клетки животных способны выдерживать до 25–30%  $D_2^{16}O$ , растений – до 60%  $D_2^{16}O$ , а клетки простейших микроорганизмов способны существовать на 90%  $D_2^{16}O$  (рис. 1).

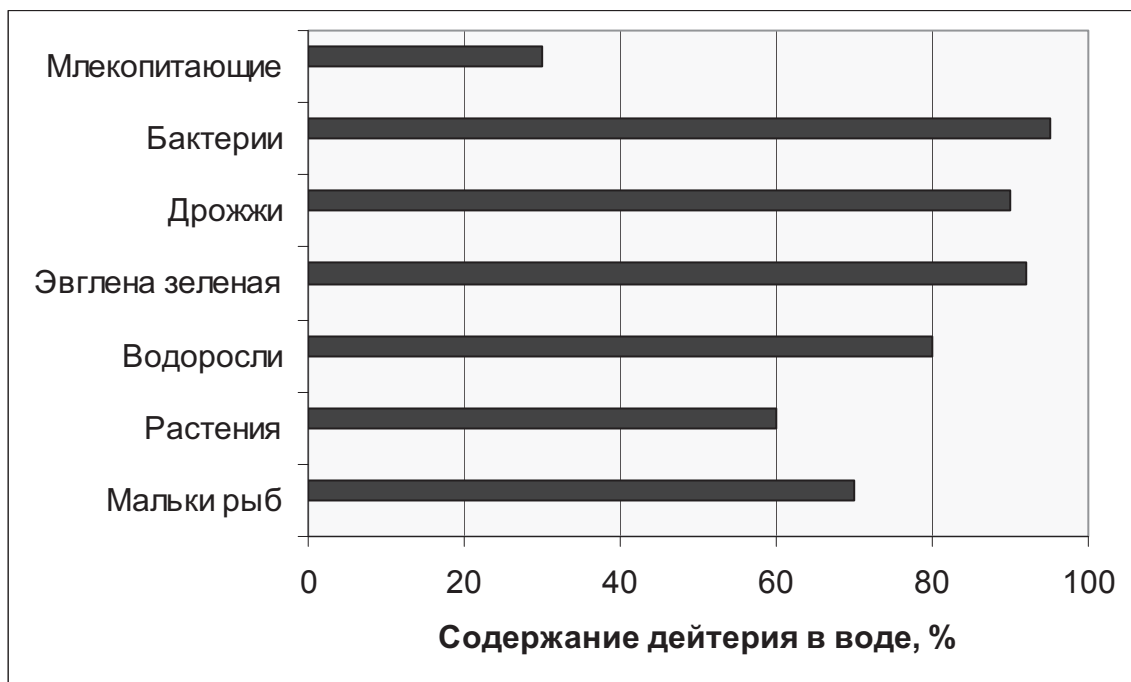


Рис. 1. Выживаемость различных организмов в воде с различными содержаниями дейтерия (по данным экспериментальных исследований авторов).

Попадая в организм,  $D_2^{16}O$  может стать причиной нарушений обмена веществ, работы почек и гормональной регуляции. При больших концентрациях  $D_2^{16}O$  в организме подавляются ферментативные реакции, клеточный рост, углеводный обмен и синтез нуклеиновых кислот. Действию  $D_2^{16}O$  особенно подвержены те системы, наиболее чувствительные к замене  $H^+$  на  $D^+$ , которые используют высокие скорости образования и разрыва водородных связей. Такими клеточными системами являются аппарат биосинтеза макромолекул и дыхательная цепь. Последний факт позволяет рассматривать биологическое воздействие  $D_2^{16}O$  как комплексное негативное воздействие, действующее одновременно на функциональное состояние большого числа систем: метаболизм, биосинтетические процессы, транспорт веществ, структуру и функции макромолекул. В результате это приводит к ингибированию клеточного роста и последующей гибели клеток в  $D_2^{16}O$ . Это происходит даже при использовании растворов  $D_2^{16}O$  с водой.

Тем не менее, “тяжелая” вода играет определенную роль в различных биологических процессах. Систематическое изучение воздействия  $D_2^{16}O$  на клетки животных, растений и бактерий в России начато сравнительно недавно [11]. Эксперименты показали, что  $D_2^{16}O$  действует негативно на жизненные функции организмов, замедляет клеточный метаболизм и ингибирует митоз в стадии профазы; это происходит даже при использовании обычной природной воды с повышенным содержанием  $D_2^{16}O$  или  $HD^{16}O$  [8]. В экспериментах на мышах подопытных животных поили водой, 1/3 часть которой была заменена водой изотопного состава  $HD^{16}O$ . Через несколько дней после потребления  $HD^{16}O$  у животных наблюдалось расстройство обмена веществ с последующим разрушением почек. При увеличении концентрации дейтерия в потребляемой воде у животных наблюдался летальный исход [12]. Уменьшение концентрации дейтерия в питьевой воде стимулирует биологические процессы и обмен веществ. Этот факт свидетельствует о том, что дейтерий тормозит, а протий способствует интенсификации обмена веществ в биологических объектах.

Наши исследования показали, что “тяжелая” вода также способна вызывать физиологические, морфологические, цитологические и генетические изменения в клетке – клетки, выращенные в  $D_2^{16}O$ , имели в 2–3 раза большие размеры и более толстую клеточную стенку с неравномерным распределением в них ДНК [13]. Возможное повреждение клеточного генофонда тяжелыми изотопами в составе воды может иметь негативные последствия для человечества, если оно не перейдет на употребление воды, обедненной D и другими тяжелыми изотопами –  $^{18}O$  и T. В начале XXI-го века появилось мнение о полном исключении D,  $^{18}O$  и T из питьевой воды. Эта задача достигается различными физико-химическими методами – изотопным обменом в присутствии палладия или платины, многоступенчатым электролизом воды в сочетании с каталитическим изотопным обменом между водой и водородом; низкотемпературной ректификацией жидкого водорода с последующим сжиганием водорода с кислородом; вакуумной заморозкой воды с последующим оттаиванием, вакуумной ректификацией и др. Для получения особо чистой  $H_2^{16}O$  проводят очень тонкую, многостадийную очистку природной воды совокупностью вышеуказанных методов, или синтезируют воду из исходных газообразных элементов  $^1H_2$  и  $^{16}O$ , которые предварительно пропускают через адсорбционный фильтр. Воду такой высокой степени химической и изотопной очистки применяют в экспериментах и процессах, требующих исключительной чистоты химических реактивов.

По данным Г. Д. Бердышева, даже неглубокая (на 5–10%) очистка воды от тяжелых изотопов D и  $^{18}O$  способна значительно улучшить ее качества и придать воде полезные очистительные свойства [14]. В Институте медико-биологических проблем РАН был проведен 240-суточный эксперимент по изучению изменений изотопного состава биогенных химических элементов в организме человека, в ходе которого установлено, что в условиях сильного стресса и неблагоприятных внешних воздействий организм, в первую очередь, выводит тяжелые изотопы D и  $^{18}O$  за счет реакций изотопного ( $H/D$ ,  $^{16}O/^{18}O$ -обмена) [15]. Поэтому для повышения жизненных сил организма в условиях неблагоприятных внешних

воздействий целесообразно потреблять очищенную от тяжелых изотопов воду. В Японии, США и некоторых других странах “легкую” воду используют для лечения и профилактики опухолевых заболеваний. Снижение риска онкологических заболеваний при регулярном употреблении “легкой” воды связывают с очисткой организма от тяжелых изотопов, в первую очередь, от дейтерия.

Эксперименты на животных и растениях показали, что при потреблении воды с пониженным на 25–30% содержанием дейтерия свиньи, крысы и мыши дают более крупное и многочисленное потомство, содержание домашней птицы с 6-суточного возраста до половозрелости на такой воде приводит к ускоренному развитию половых органов (по размерам и весу) и усилению процесса сперматогенеза, яйценоскость кур повышается почти вдвое, пшеница созревает раньше и дает более высокий урожай [16]. Кроме того, вода с пониженным содержанием дейтерия задерживает появление первых узелков метастаз на месте перевивки рака шейки матки, оказывает иммуномоделирующее и радиопротекторное действие. Потребление “легкой” воды онкологическими больными во время или после сеансов лучевой терапии позволяет восстановить нормальный состав крови и снять приступы тошноты после сеансов. По данным Г. Шомлаи, результаты клинических испытаний, проведенных в 1994–2001 г.г. в Венгрии, показали, что уровень выживаемости больных, употреблявших “лёгкую” воду в сочетании с традиционными методами лечения или после них выше, чем у больных, использовавших только химио- или лучевую терапию.

Исследования “легкой” воды в Московском научно-исследовательском онкологическом институте им. П. А. Герцена и в НИИ Канцерогенеза Российского Онкологического Научного центра им. Н.Н. Блохина РАМН совместно с Институтом медико-биологических проблем [17] подтвердили ингибирующее влияние “легкой” воды на процесс роста различных опухолей и установили, что в среде с более низким, чем природное, содержанием дейтерия деление опухолевых клеток аденокарциномы молочных желез MCF-7 начинается с задержкой на 5–10 часов. У 60% мышей с подавленным иммунитетом и пересаженными грудными человеческими опухолями MDA и MCF-7 прием “легкой” воды (30 ppm) вызывал регрессию опухолей. У группы мышей с пересаженной человеческой опухолью простаты PC-3 прием “легкой” воды (90 ppm) увеличивал уровень выживаемости на 40%, при этом соотношение числа делящихся клеток к погибшим в опухолях животных опытной группы составляло 1,5 : 3, а контрольной группе – 3,6 : 1. Особого внимания заслуживают два показателя: задержка метастазирования и потеря веса животных за время экспериментов. Ярко выраженное стимулирующее действие “легкой” воды на иммунную систему животных приводит к задержке развития метастазов на 40% по сравнению с контрольной группой, а потеря массы у животных, потребляющих “легкую” воду, к концу опытов была в два раза меньше.

При воздействии на подопытных животных  $\gamma$ -облучением в дозе LD50 обнаружено, что выживаемость животных, употреблявших в течение 15 дней перед облучением “легкую” воду (30 ppm), в 2,5 раза выше, чем в контрольной группе (доза облучения 850 R), что указывает на радиопротекторные свойства “легкой” воды. При этом у выживших мышей опытной группы количество лейкоцитов и эритроцитов в крови оставалось в пределах нормы, в то время как в контрольной группе оно значительно сократилось. Было отмечено также четкое положительное влияние воды на показатели насыщения тканей печени кислородом: при этом увеличение показателя парциального давления кислорода ( $pO_2$ ) составляло 15%, что свидетельствует об увеличении дыхания клеток в 1,3 раза. О полезном действии облегченной по дейтерию воды на здоровье подопытных животных свидетельствует и их повышенная резистентность и увеличение веса по сравнению с контрольной группой. Это означает, что употребление “легкой” воды для жителей больших городов, в условиях повышенного радиационного фона, является обоснованным. “Лёгкая” вода также увеличивает скорость метаболических реакций, например, при старении, метаболическом синдроме, диабете и др. [18]. Кроме этого, согласно данным предварительных исследований, в пробах “легкой” воды сперматозоиды несколько дольше

сохраняли свою функциональную активность, которая повышается по мере снижения содержания дейтерия в воде. Данные факты способствуют разработке в будущем новых эффективных технологий и установок для извлечения тяжелых изотопов из воды.

#### **Анализ существующих установок извлечения тяжелых изотопов D и T из воды**

В настоящее время существует несколько способов извлечения тяжелых изотопов из воды: изотопный обмен в присутствии палладия и платины, электролиз воды в сочетании с каталитическим изотопным обменом между водой и водородом, колоночная ректификация, вакуумное замораживание холодного пара с последующим оттаиванием и др. [19]. В способе получения обедненной дейтерием питьевой воды за счет замораживания-оттаивания льда получение льда осуществляют замораживанием пара, образующегося из исходной воды при температуре, не превышающей  $+10^{\circ}\text{C}$ , а в процессе оттаивания льда на него дополнительно воздействуют ультрафиолетовым и инфракрасным излучениями и насыщают талую воду газом или смесью газов. При смешивании “легкой” ( $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ) и “тяжелой” ( $\text{D}_2^{16}\text{O} + \text{T}_2^{16}\text{O}$ ) воды происходит изотопный обмен:  $\text{H}_2^{16}\text{O} + \text{D}_2^{16}\text{O} = 2\text{HD}^{16}\text{O}$ ;  $\text{H}_2^{16}\text{O} + \text{T}_2^{16}\text{O} = 2\text{HT}^{16}\text{O}$ . Поэтому дейтерий и тритий в обычной воде находятся в форме  $\text{HD}^{16}\text{O}$  и  $\text{HT}^{16}\text{O}$ . При этом температура замерзания для  $\text{D}_2^{16}\text{O}$  составляет  $+3,8^{\circ}\text{C}$ , а для  $\text{T}_2^{16}\text{O}$   $+9^{\circ}\text{C}$ .  $\text{HD}^{16}\text{O}$  и  $\text{HT}^{16}\text{O}$  замерзают, соответственно, при  $+1,9^{\circ}\text{C}$  и при  $+4,5^{\circ}\text{C}$ . Установлено, что при температуре в пределах  $+1,9 \dots 0^{\circ}\text{C}$  молекулы воды с дейтерием и тритием, в отличие от “легкой” воды, находятся в метастабильно-твердом неактивном состоянии. Это свойство лежит в основе фракционного разделения  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  и  $\text{HD}^{16}\text{O}$  путем создания разрежения воздуха над поверхностью воды при данной температуре. “Легкая” вода интенсивно испаряется и улавливается при помощи морозильного устройства, превращаясь в лед. “Тяжелая” вода, находясь в неактивном твердом состоянии и обладая значительно меньшим парциальным давлением, остаётся в испарительной емкости исходной воды вместе с растворенными в воде солями и примесями. На этом принципе работает сконструированная Г. Д. Бердышевым и И. Н. Варнавским совместно с институтом экспериментальной патологии, онкологии и радиобиологии им. Р. Кавецкого РАН Украины первая в мире промышленная установка ВИН-4 “Надія” по производству “легкой” воды с пониженным на 30-35% содержанием дейтерия и трития (рис. 2). Установка состоит из корпуса 1, в котором установлена испарительная емкость 2 для исходной воды с устройствами нагрева 3 и охлаждения воды 4. Установка оснащена вентилем 5 для подачи воды в испаритель и вентилем 6 для слива отработанного остатка, обогащенного тяжелыми изотопами водорода. В корпусе установки расположено устройство 7 для конденсации и замораживания холодного пара в виде набора тонкостенных трубчатых элементов, соединенных с насосом для прокачивания хладагента. Устройство 7 совместно с источниками ультрафиолетового 8 и инфракрасного 9 излучений размещено над емкостью 10 для сбора талой воды. Внутренняя полость корпуса 1 соединена патрубком 11 с вакуумным насосом – источником разрежения воздуха. Корпус 1 снабжен устройством 12 для подачи во внутреннюю полость установки очищенного воздуха или смеси газов. Дополнительно установка ВИН-4 оборудована системой терморегулирования в полости испарительной емкости 2 для контроля заданной температуры процесса испарения исходной обрабатываемой воды. Кроме этого, в корпусе имеются иллюминаторы для наблюдения за процессами испарения, замораживания холодного пара и таяния льда – 13 и 14. Емкость сбора талой воды 10 снабжена вентилями 15 для слива талой воды и патрубком 16 для соединения с блоком формирования структуры и свойств талой воды 17. Блок 17 включает внутреннюю коническую емкость 18 с минералами и доломитом. На выходе емкости 19 установлен адсорбционный фильтр 20 и сливной вентиль 21.

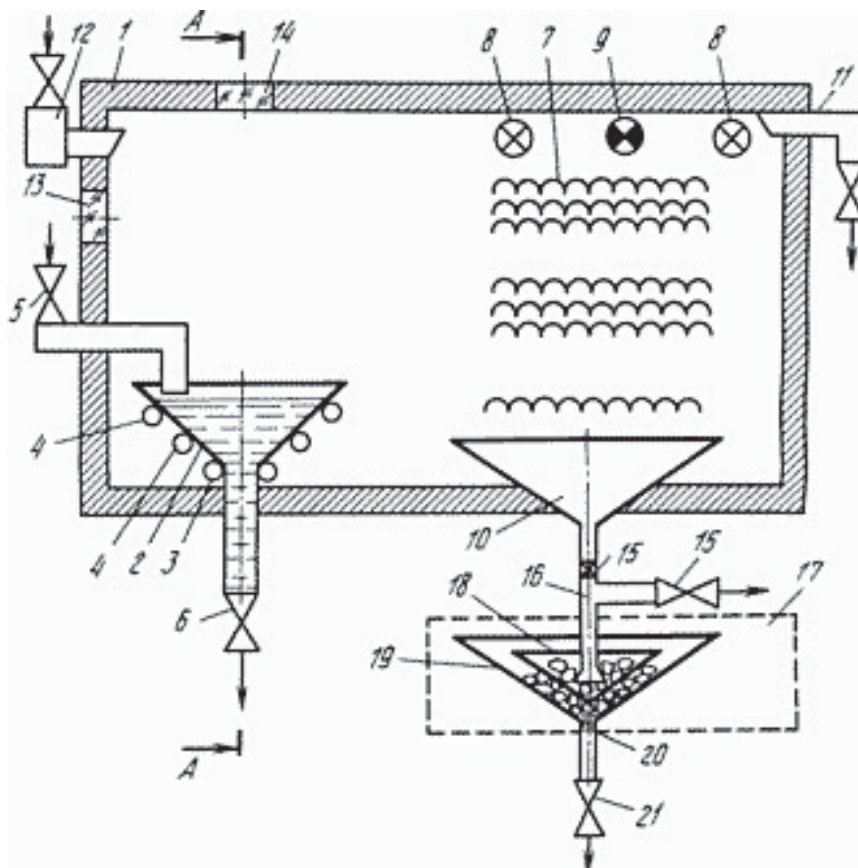


Рис. 2. Схематическое изображение установки ВИН-4 “Надія”. Обозначения: 1 – корпус, 2 – испарительная емкость, 3 – устройство для нагрева воды, 4 – устройство для охлаждения воды, 5 – вентиль для подачи воды в испаритель, 6 – вентиль для слива отработанного остатка, 7 – устройство для конденсации и замораживания холодного пара, 8, 9 – источники ультрафиолетового и инфракрасного излучений, 10 – емкость для сбора талой воды, 11 – вакуумный насос, 12 – устройство для подачи очищенного воздуха или смеси газов, 13, 14 – иллюминаторы для наблюдения за процессами испарения и замораживания пара и таяния льда, 15 – вентиль для слива талой воды, 16 – патрубков, 17 – блок формирования структуры и свойств талой воды, 18 – внутренняя коническая емкость с минералами, 19 – внешняя коническая емкость с минералами, 20 – адсорбционный фильтр, 21 – сливной вентиль.

Альтернативную электролизную установку по получению питьевой воды с пониженным содержанием дейтерия сконструировали в 2000 году Ю. Е. Синяк, В. Б. Гайдадымов и А. И. Григорьев из Института медико-биологических проблем в Москве [20]. Установка содержит емкость 1 с конденсатом атмосферной влаги или дистиллятом, которая соединена с анодной камерой 2 электролизера с ионообменным электролитом. Электролизер содержит пористые электроды (анод 2 и катод 3) из титана, покрытые платиной, преобразователь электролизных газов в воду, конденсатор 10 и сборник “легкой” воды. Кроме того, устройство дополнительно снабжено осушителем кислорода 4, реактором изотопного  $D_2/H_2^{16}O$  обмена 5, внешние боковые стенки которого образованы из ионообменных мембран, и кондиционером для воды 11 (рис. 3). Внешние стенки реактора 5 и осушителя 4 образованы из ионообменных мембран 6, 8; осушитель кислорода содержит ионообменный катионит, а кондиционер для воды 11, в свою очередь, образован из фильтра со смешанными слоями ионообменных материалов - адсорбента и минерализатора, содержащего гранулированные кальций-магний карбонатные материалы. Конденсат атмосферной влаги или дистиллят поступает в анодную камеру электролизера с твердым электролитом, где осуществляется процесс электролиза при температуре 60-80 °С. Образующиеся в результате электролиза обедненные дейтерием газообразные водород и



кислород с парами воды подают в осушитель кислорода 4, где происходит сушка за счет сорбции паров воды ионообменным наполнителем (катионитом) и прохождения через ионообменные мембраны 6. Затем высушенный электролизный водород подается в каталитический реактор изотопного обмена 5, где он подвергается изотопному  $D_2/H_2^{16}O$  обмену с парами воды и водородом на катализаторе, состоящим из активированного угля с добавками 4–10% фторопласта и 2–4% палладия или платины. После изотопного  $D_2/H_2^{16}O$  обмена водород осушают от паров воды ( $D_2^{16}O$ ), которые сорбируются и удаляются через ионообменники реактора 8, размещенные на его внешних боковых стенках. Осушенные газы поступают в преобразователь электролизных газов и в каталитическую горелку 9. Пламя факела направляют в конденсатор 10, охлаждаемый в протоке водопроводной водой, где пары воды конденсируются и поступают в кондиционер 11 для доочистки на сорбционном фильтре. Затем вода поступает в сборник воды, обедненной дейтерием 12. Охлаждение устройства и работа ионообменных мембран по осушке электролизных газов от паров воды осуществляется вентилятором 7. Окончательную доочистку воды и последующую ее минерализацию проводят содержащими кальций и магний карбонатными минералами, в т.ч. доломитом. Производительность установки по “легкой” воде составляет 50 мл воды в час.

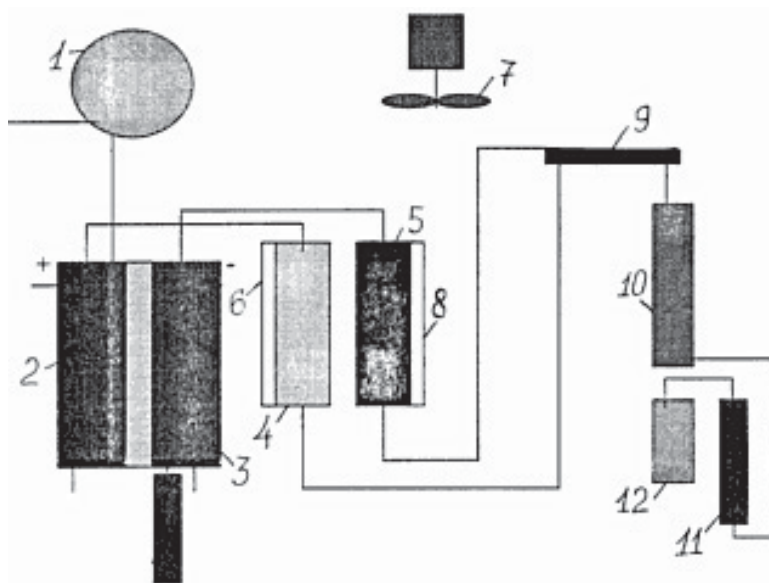


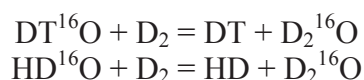
Рис. 3. Схематическое изображение электролизной установки получения “легкой” воды. Обозначения: 1 – емкость конденсата атмосферной влаги, 2 – анод, 3 – катод, 4 – осушители кислорода, 5 - реактор изотопного  $D_2/H_2^{16}O$  обмена, 7 – вентилятор, 6, 8 – ионообменная мембрана, 9 – каталитическая горелка, 10 – конденсатор, 11 – кондиционер воды с доломитом, 12 – сборник “легкой” воды.

При электролизном процессе удается снизить содержание дейтерия в воде на 60% и выше, но у воды проявляются свойства дистиллированной воды (отсутствие минерализации, повышенное содержание растворенных газов, неупорядоченная молекулярная структура воды). Преимуществом электролизного процесса является максимально возможное удаление дейтерия (до 90%).

При вакуумном замораживании-оттаивании получают микроминерализованную питьевую воду со сниженным содержанием дейтерия на 10–35% и с упорядоченной “льдоподобной” структурой, характерной для талой воды. Поэтому авторы отдают предпочтение способу обработки воды, разработанному украинскими учеными.

Разработанные в последние годы комбинированные методы изотопного обмена и ректификации воды позволяют получать воду высокой степени изотопной чистоты. Первая в мире ректификационная установка по изотопной очистке воды была спроектирована в 1975г. швейцарской фирмой SULZER и введена в эксплуатацию на реакторе HFR ILL. В 1987г. аналогичная, но более мощная установка была создана в Канаде для канадских АЭС. В конце

90-х годов в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П. Константинова была создана первая отечественная ректификационная колонна по изотопному разделению воды. Высота колонны – 10 м, диаметр – 80 мм. В основу этой установки заложен комбинированный метод изотопного обмена в системе “пары воды – водород” и низкотемпературной ректификации изотопов водорода. В ходе реакции каталитического изотопного обмена (КИО) между парами воды и дейтерием при температуре 200 °С происходит извлечение протия и трития из “тяжёлой” воды и их последующий перевод в газообразную фазу:



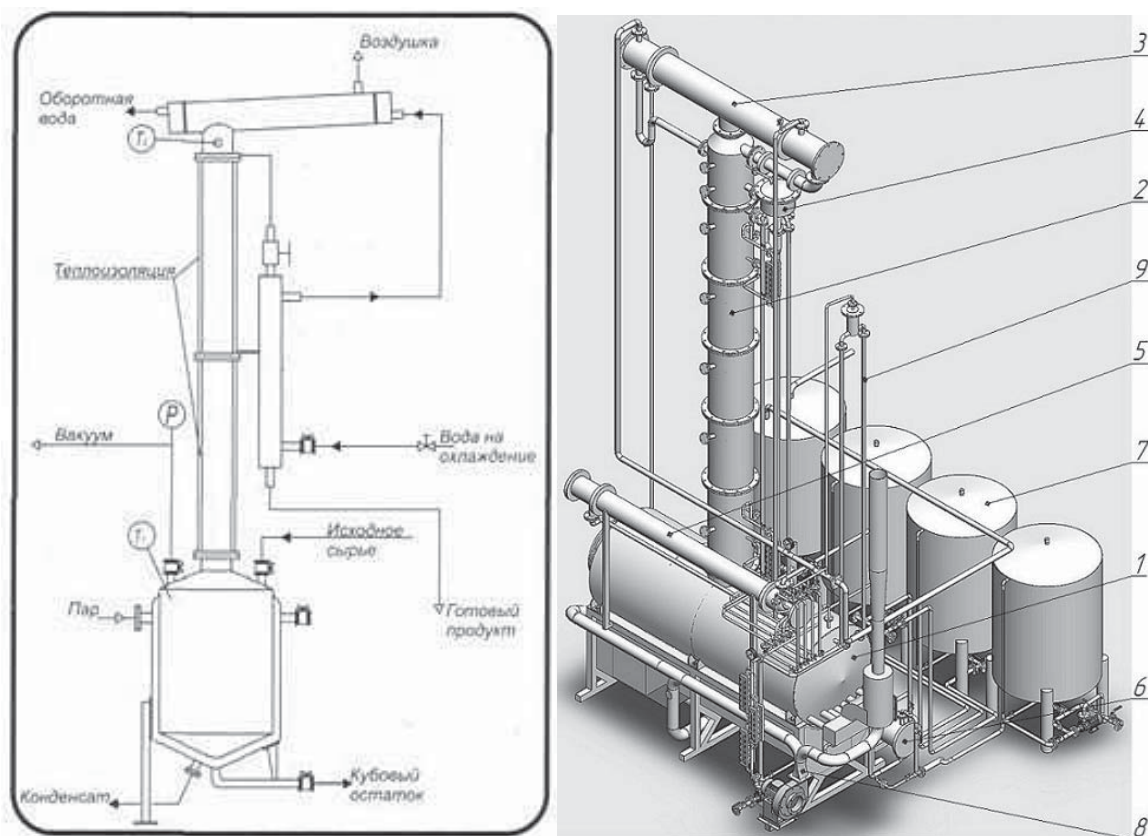
Степень извлечения трития из “тяжелой” воды определяется константой равновесия и при трехступенчатой очистке составляет не более 30%. Очищенная от протия и трития “тяжелая” вода возвращается в реактор. Смесь изотопов водорода – D<sub>2</sub>, DT, HD после очистки от примесей и охлаждения до температуры 25 °К подается в низкотемпературную колонну. За счет процессов массообмена между газообразной и жидкой фазой изотопов водорода происходит концентрирование трития в нижней, а протия – в верхней части колонны. Обедненный по протию и тритию поток дейтерия в виде D<sub>2</sub><sup>16</sup>O возвращается в блок КИО. Из верхней части низкотемпературной колонны происходит отбор концентрата протия – в виде “легкой” воды, а из нижней – концентрат трития в виде тритиевой воды.

Ректификация воды практически осуществляется в противоточных колонных аппаратах с контактными элементами – насадками или тарелками. В этом процессе происходит непрерывный обмен между движущимися относительно друг друга молекулами жидкой и паровой фазы. Жидкая фаза обогащается более высококипящим компонентом, а паровая фаза – более низкокипящим – D, T и <sup>18</sup>O. В большинстве случаев ректификацию осуществляют в противоточных колонных аппаратах с различными контактными элементами (рис. 4).

Процесс массообмена происходит по всей высоте колонны между стекающей вниз флегмой и поднимающимся вверх водяным паром. Чтобы интенсифицировать процесс массообмена часто применяют контактные элементы – насадки и тарелки, что позволяет увеличить поверхность массообмена. В случае применения насадки вода стекает тонкой пленкой по ее поверхности, в случае применения тарелок водяной пар проходит через слой воды на поверхности тарелок.

Расчет ректификационной колонны производится по диаграмме кипения воды для заданных параметров ректификации – состава исходной воды, кубового остатка, дистиллята, производительности и рабочем давлении в колонне. Затем подбирается тип и количество тарелок, определяется скорость движения пара, диаметр колонны, коэффициенты массопередачи, высота колонны, гидравлическое сопротивление тарелок. После этого проводится расчет эксплуатационных свойств, а также экономические показатели использования ректификационной колонны. На практике для более глубокого извлечения тяжелых изотопов D и T из воды используется не одна ректификационная колонна, а батарея из 10 и более отдельных колонн (до 20).

Данный метод изотопного разделения воды имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с электролизным методом и позволяет производить очистку природной воды от дейтерия до величин порядка 20–30 ppm. Кроме того, производительность изотопной очистки воды этим методом несколько выше других способов, что существенно снижает ее стоимость. Предполагается, что при широкомасштабном производстве “лёгкой” воды, в будущем она станет доступной каждому человеку.



а) б)  
 Рис. 4. Схема (а) и изображение (б) типовой ректификационной колонны. Обозначения: 1 – корпус; 2 – колонна; 3 – конденсатор; 4 – делитель; 5 – холодильник дистиллята; 6 – холодильник кубового остатка; 7 – сборник; 8 – система надува; 9 – система трубопровода.

### Выводы

Получаемая с помощью современных технологий извлечения тяжелых изотопов “лёгкая” вода обладает широким спектром полифизиологического воздействием на организм человека (противоопухолевое, радиопротекторное, общее оздоравливающее). Основное действие, оказываемое “легкой” водой заключается в постепенном снижении содержания дейтерия в физиологических жидкостях тела за счет реакций изотопного (H-D) обмена. Анализ собственных и имеющихся в научной литературе результатов позволяет говорить о том, что потребление “легкой” воды позволяет улучшить работу важнейших жизненных систем организма. Учитывая роль воды в организме, рассчитанные изотопные эффекты “тяжелой” воды и результаты авторов, полученные на “легкой” воде, можно ожидать, что наибольший эффект может сказаться на регуляторных системах, метаболизме и энергетическом аппарате живой клетки, т.е. именно тех клеточных системах, которые используют высокую подвижность протонов/дейтеронов и высокую скорость разрыва водородных H- и D-связей. Кроме этого, “легкая” вода обладает меньшей вязкостью, чем “тяжелая” вода, что позволяет ей легче проникать через клеточные мембраны и тем самым регулировать скорость водообмена в организме. Растворимость неорганических солей в “легкой” воде несколько выше, чем в “тяжелой” воде, что дает ей возможность более эффективно выводить продукты метаболизма и соли из организма. Скорость ферментативных (каталитических) реакций в “легкой” воде несколько выше, чем в обычной воде. Это способствует интенсификации обменных процессов, что помогает организму быстрее восстанавливаться после больших физических нагрузок.

# ВИЛУЧЕННЯ ВАЖКИХ ІЗОТОПІВ ДЕЙТЕРІЮ, ТРИТІЮ І КИСНЮ З ВОДИ

**О.В. Мосін<sup>1</sup>, І. Ігнатов<sup>2</sup>**

1 – ФДБОЗ ВПО «Московський державний університет прикладної біотехнології»,  
Москва

e-mail: [mosin-oleg@yandex.ru](mailto:mosin-oleg@yandex.ru)

2 – Науково-дослідний центр медичної біофізики, Софія, Болгарія

*У даній статті розглянуто теоретичні та науково-практичні питання очищення питної води від важких ізотопів - D, T і <sup>18</sup>O. Проведені власні дослідження авторами ізотопних ефектів дейтерію в клітинах різних біологічних об'єктів мікробного, рослинного і тваринного походження, в результаті зроблено висновок про комплексний багатofакторний вплив дейтерію на організм. Дано конструкції апаратів, що дозволяють отримувати воду зі зниженим на 5-30% вмістом дейтерію. Наведено власні та наявні в науковій літературі дані щодо позитивного впливу води зі зниженим вмістом дейтерію на організм.*

*Ключові слова: дейтерій, тритій, кисень-18, “важка” вода, “легка” вода.*

## EXTRACTION OF HEAVY ISOTOPES OF DEUTERIUM, TRITIUM AND OXYGEN

**O. Mosin<sup>1</sup>, I. Ignatov<sup>2</sup>**

1 – Moscow State University of applied biotechnology, Moscow, Russia

e-mail: [mosin-oleg@yandex.ru](mailto:mosin-oleg@yandex.ru)

2 – Scientific Research Center for Medical Biophysics, Sofia, Bulgaria

*In present paper theoretical and scientific-practical questions of clearing of drinking water from heavy isotopes D, T and <sup>18</sup>O are considered. Studies of isotopic effects of deuterium on cells of various organisms of microbic, plant and animal origin are carried out, the conclusion is made as a result drawn on complex multifactorial influence of deuterium on an organism. Designs of the devices, allowing to receive the water depleted on 5–30 % of deuterium are given. There are cited own data and available in the scientific literature data on positive influence of deuterium depleted water on an organism.*

*Keywords: deuterium, tritium, oxygen-18, heavy water, deuterium depleted water.*

### Список литературы:

1. Кишенбаум И. Тяжелая вода. Физические свойства и методы анализа. — Москва : Атомиздат, 1953. — С. 56 — 58.
2. Зельвенский Я.Д. Тяжелые изотопы водорода в ядерной технике / Я.Д. Зельвенский , С.Г. Катальников. — Москва : Наука, 1987. — С. 78 — 80.
3. Мосин О.В. Осознание роли воды в процессе происхождения жизни / О.В. Мосин, И. Игнатов // Сознание и физическая реальность. — 2012. — № 1. — С. 1 — 18
4. Kudish I. Physical properties of heavy-oxygen water. Absolute viscosity of H<sub>2</sub><sup>18</sup>O between 15 and 35°C / Kudish I., Wolf D., Steckel F. // Journal of Chemical Society, Faraday Transactions. — 1972. — Vol. 68 (1). — P. 2041 — 2046.
5. Лобышев В.Н. Изотопные эффекты D<sub>2</sub>O в биологических системах / В.Н. Лобышев, Л.П. Калиниченко. — Москва : Наука, 1978. — С. 215.
6. Мосин О.В. Исследование методов биотехнологического получения аминокислот, белков и нуклеозидов, меченных стабильными изотопами <sup>2</sup>H и <sup>13</sup>C с высокими уровнями изотопного обогащения, Автореф. диссерт. канд. хим. наук, Москва, МГАТХТ им. М. В. Ломоносова. — 1996. — С. 1 — 26.

7. *Cioni P.* Effect of Heavy Water on Protein Flexibility / Cioni P., Strambini G.V. // *Biophysical Journal*. — 2002. — Vol. 82 (6). — P. 3246 — 3253.
8. *Мосин О.В.* Очистка воды от тяжелых изотопов дейтерия (D), трития (T) и кислорода ( $^{18}\text{O}$ ) // *Сантехника*. — 2012. — № 1. — С. 1—6.
9. *Lis G.* High-Precision Laser Spectroscopy D/H and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  Measurements of Microliter Natural Water Samples / Lis G., Wassenaar L.I., Hendry M.J. // *Analytical Chemistry*. — 2008. — Vol. 80 (1). — P. 287—293.
10. *Мосин О.В.* Исследование физиологической адаптации бактерий на тяжёловодородной среде / О.В. Мосин, Д.А. Складнев, В.И. Швец // *Биотехнология*. — 1999. — № 8. — С. 16—23.
11. *Денько Е.И.* Действие тяжёлой воды ( $\text{D}_2\text{O}$ ) на клетки животных, растений и микроорганизмы // *Успехи современной биологии*. — 1970. — Т. 70 (4). — С. 41—47.
12. *Thomson J.F.* Physiological effects of  $\text{D}_2\text{O}$  in mammals // *Annals of the New York Academy of Sciences*. — 1960. — Vol. 84. — P. 736—744.
13. *Мосин О.В.* Изотопные эффекты дейтерия в клетках бактерий и микроводорослей при росте на тяжелой воде ( $\text{D}_2\text{O}$ ) / О.В. Мосин, И. Игнатов // *Вода Химия и экология*. — 2012. — № 3. — С. 83 — 94.
14. *Мосин О.В.* Дейтерий, тяжелая вода, эволюция и жизнь // *Водоочистка Водоснабжение Водоподготовка*. — 2009. — № 4. — С. 5—8.
15. Бердышев Г.Д., Варнавский И.Н., Прилипенко В.Д. Аквабиотика — наука о роли воды в жизненных процессах / в кн.: *Информоэнергетика III-го тысячелетия: социолого-синергетичні та медично-екологічні підходи*, Київ, Кривий Ріг, “ЗТНВФ “Коло”, 2003. — С. 22—28.
16. *Варнавский И.Н.* Новая технология и установка для получения очищенной биологически активной целебной питьевой воды, диссерт. докт. техн. наук, Москва. — 2000.
17. Сергеева Н.С., Свиридова И.С., Тимаков А.А. Исследование влияния воды с пониженным содержанием дейтерия на рост перевивных культур опухолевых клеток человека в экспериментах *in vitro* / *Материалы конференции «Новые биокибернетические и телемедицинские технологии XXI века»*, Петрозаводск. — 2003. — С. 39.
18. А. К. Мартынов, И. В. Артемкина, А. А. Тимаков, Т. И. Москвичева, Оценка биологической активности воды с пониженным содержанием дейтерия, *Материалы конференции «Новые биокибернетические и телемедицинские технологии XXI века»*, Петрозаводск. — 2003. — С. 57.
19. *Мосин О.В.* Методы получения белков и аминокислот, меченных стабильными изотопами  $^2\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  и  $^{15}\text{N}$  / О.В. Мосин, Д.А. Складнев, В.И. Швец // *Биотехнология*. — 1996. — № 3. — С. 12—32.
20. Синяк Ю.Е., Григорьев А.И., Гайдадымов В.В., Медникова Е.И., Лебедева З.Н., Гуськова Е.И. Метод получения бездейтериевой воды и исследование ее влияния на физиологический статус, *Космическая биология и авиакосмическая медицина / Материалы XI конференции*. — 1998. — № 2. — С. 201.