

УДК 628.16

DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar108473>

Обзорная статья



Побочные продукты обеззараживания хозяйственно-питьевой воды при размещении войск в полевых условиях

Ж.В. Плахотская, В.П. Андреев, А.В. Кривцов

Военно-медицинская академия, Санкт-Петербург, Россия

На основании изучения данных, опубликованных в открытых источниках, проведена сравнительная оценка характеристик потенциальной опасности методов обеззараживания воды на предмет образования в процессе или в результате ее очистки веществ, обладающих токсичным и (или) канцерогенным действием. Установлено, что применение практически всех методов дезинфекции, как традиционных, так и перспективных, сопровождается образованием побочных продуктов дезинфекции непосредственно в хозяйственно-питьевой воде или в составе стоков в виде удаленных из воды загрязнителей. В настоящее время наиболее распространенным, эффективным и экономически выгодным способом обеззараживания воды является использование хлорсодержащих препаратов. Такой способ обеспечивает уничтожение большинства патогенных микроорганизмов, что определяет широту применения хлорсодержащих препаратов в мировой практике очистки и обеззараживания воды, несмотря на то что при их использовании происходит образование большого числа побочных продуктов дезинфекции. Поскольку концентрации последних зависят от параметров процесса обеззараживания, решать проблему безопасности предлагается путем строгого выполнения условий технологического процесса, а не запрещением применения тех или иных методик.

Наиболее перспективным для совершенствования водоподготовки в полевых условиях, имеющим наименьшее количество побочных продуктов дезинфекции, является подход к обеззараживанию воды, который включает две альтернативные системы: обратный осмос и ультрафильтрацию (а в перспективе — нанофильтрацию) с возможностью выбора одного из этих вариантов очистки.

Ключевые слова: водоподготовка; водоснабжение войск; нанофильтрация; наночастицы; обеззараживание воды; побочные продукты дезинфекции; технологические стоки очистки.

Как цитировать:

Плахотская Ж.В., Андреев В.П., Кривцов А.В. Побочные продукты обеззараживания хозяйственно-питьевой воды при размещении войск в полевых условиях // Известия Российской Военно-медицинской академии. 2023. Т. 42. № 1. С. 65–74. DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar108473>

DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar108473>

Review Article

By-products of disinfection of potable water at placing of armies in field conditions

Zhanna V. Plakhotskaya, Vladimir P. Andreev, Andrey V. Krivtsov

Russian Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia

On the basis of studying of the data published in open sources, the problem of the comparative characteristic of potential danger of various methods of disinfection of water about formation in process or as a result of its clearing of the substances possessing toxic and (or) cancerogenic action dared. Application of practically all methods, both traditional, and perspective is established, that is accompanied by formation of by-products of disinfection directly in potable water or as a part of drains in the form garbage removed from the water.

Now the most widespread, effective and economic way of disinfection water is the use of chlorine-containing preparations. Such approach provides destruction of the majority of pathogenic microorganisms that defines the application of chlorine-containing preparations in world practice of clearing and water disinfecting in spite of the fact that at their use there is a formation of the big number of products of collateral disinfection.

As concentration of the last depends on parameters of the process of disinfection, to solve a safety problem it is offered by strict observance of conditions of technological process, instead of prohibition of application of those or other techniques.

The most perspective for water preparation perfection in the field conditions, having the least quantity of by-products of disinfection, is the approach to disinfecting of water which includes two alternative systems: reverse osmosis and an ultrafiltration (and in the long term — nanofiltration) with possibility of a choice of one of these variants of clearing.

As concentration of the last depends on parameters of the process of clearing, to solve a safety problem it is offered by strict observance of conditions of technological process, instead of prohibition of application of those or other techniques.

The basis for refusal of connection of field camp to the centralised networks of water supply and use of the chlorinated potable water is not revealed.

Keywords: by-products of disinfection; nanofiltration; nanoparticles; technological effluents; water disinfection; water supply to the troops; water treatment.

To cite this article:

Plakhotskaya ZhV, Andreev VP, Krivtsov AV. By-products of disinfection of potable water at placing of armies in field conditions. *Russian Military Medical Academy Reports*. 2023;42(1):65–74. DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar108473>

Received: 02.06.2022

Accepted: 18.09.2022

Published: 31.03.2023

Актуальность исследований, посвященных решению проблем, связанных с совершенствованием полевого водообеспечения военнослужащих, определяется как возросшей интенсивностью мероприятий оперативной и боевой подготовки Вооруженных сил Российской Федерации в последние годы, так и их участием в урегулировании ряда вооруженных конфликтов начала XXI в., в ходе которых задачи выполняются зачастую за пределами пунктов постоянной дислокации, в полевых условиях.

При размещении войск вне мест постоянной дислокации должно быть гарантировано обеспечение полевого лагеря достаточным количеством доброкачественной питьевой воды*. В методиках водоподготовки применяются различные агенты дезинфекции, которыми могут быть как химические вещества, так и физические факторы. Практически все химические агенты по степени воздействия на организм человека относятся ко 2-му классу опасности (высокотоксичным веществам). Физические факторы (электрические разряды, ультразвук, ультрафиолетовое излучение и др.), применяемые в мощностях, обеспечивающих обеззараживание, также представляют опасность для человека. Совершенствование водоподготовки требует обязательного анализа действующих и разрабатываемых способов обеззараживания воды на предмет выявления возможных рисков их использования и выработки рекомендаций по внедрению наиболее безопасных методик. Актуальным направлением анализа является сравнительная характеристика источников возможной опасности, которую представляют не столько сами обеззараживающие вещества, сколько продукты, образующиеся в процессе или в результате очистки воды. Вещества, образующиеся в результате взаимодействия агентов дезинфекции с веществами, исходно содержащимися в воде, называют побочными продуктами дезинфекции (ППД) [1].

Цель исследования — на основании литературных данных дать сравнительную оценку широкому спектру способов дезинфекции воды, применяемых в полевых условиях, с позиций возможного влияния их побочных продуктов на организм человека и окружающую среду.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В обзоре использованы и проанализированы данные, опубликованные в открытых отечественных и зарубежных литературных источниках.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Химические агенты дезинфекции, прежде всего хлор, применяются для обеззараживания воды перед ее подачей в сети централизованного водоснабжения городов,

поселков и военных городков, а также при размещении войск вне мест постоянной дислокации. Подключение полевого лагеря к существующим водораспределительным сетям является наиболее предпочтительным вариантом водообеспечения войск в этих условиях [2]. Образование ППД при использовании хлора и любых иных химических агентов зависит от параметров процесса: pH, температура, тип дезинфицирующего средства, доза, время контакта, точка применения дезинфицирующего средства и т. д. Некоторые побочные продукты являются галогензамещенными ППД. Галогенированные органические побочные продукты образуются в результате реакции содержащегося в воде природного органического материала (гуминовые кислоты, танины, фенолы, фульвокислоты, хиноны и др.) со свободным хлором и свободным бромом. Свободный хлор может применяться для дезинфекции воды непосредственно или же выделяться при применении диоксида хлора или хлорамина в качестве вторично образуемого дезинфицирующего средства. Свободный бром образуется при окислении ионов бромидов в воде [3–8].

ППД, образующиеся при обработке воды газообразным хлором, наиболее подробно изучены, что связано с более чем вековым опытом применения этого способа обеззараживания. Хлор представляет собой надежное дезинфицирующее средство. По этой причине хлорирование является наиболее предпочтительным методом обеззараживания воды на станциях водоподготовки в странах с теплым климатом. Обработка воды хлором широко применяется, например, для дезинфекции воды в Турции [4–9].

Данные исследований с применением современных высокочувствительных и высокоселективных методов свидетельствуют, что одновременно в воде после обработки могут присутствовать более 500 ППД.

При хлорировании образуются вещества следующих классов: МХ-связанные галофураноны (3-гало-4-(дихлорметил)-5-гидрокси-2(5)-фурано), галоалканы/алкены, негалогенированные ароматические углеводороды и др. Наиболее опасными из них являются тригалометаны (ТГМ). Такое общее название данной группы веществ объясняется тем, что их молекулы представляют собой продукты замещения трех атомов водорода в структуре метана атомами каких-либо галогенов. Понятно, что присутствие активного хлора приводит к замещению водорода преимущественно хлором и образуется хлороформ. Наличие в воде наряду с хлором еще и брома обуславливает образование бромдихлорметана. ТГМ способны оказывать негативное влияние на здоровье людей. Например, дезинфекция хлором воды в бассейнах может вызвать у детей «плавательную астму», которая является известной аллергической реакцией, вызываемой вдыханием хлороформа [8, 10–12]. Последний помимо аллергического обладает также и канцерогенным действием. По этой причине хлороформ и бромдихлорметан

* Приказ министра обороны Российской Федерации «Об утверждении Правил организации размещения и быта войск при расположении в полевых условиях (лагерях)» от 28 января 1996 г. № 39.

по санитарно-токсикологическому признаку отнесены к группе канцерогенов 1-го класса опасности (чрезвычайно опасные). В эпидемиологическом плане имеется информация по отмеченным случаям рака мочевого пузыря, толстой и прямой кишки, поджелудочной железы и головного мозга, которые связывают с употреблением хлорированной воды, содержащей ТГМ. Эффект от присутствия в хозяйственно-питьевой воде ТГМ находится в прямой зависимости от дозы вещества. Установлено, что повышенная доза хлороформа, введенная мышам в один прием, вызывает повреждение печени и впоследствии онкологические заболевания. Однако при введении мышам хлороформа в том же количестве с питьевой водой печень постепенно выводит его из организма, т. к. животные пьют воду не одновременно, а в течение всего эксперимента. Таким образом, ни в почках, ни в каких-либо других подверженных воздействию ТГМ органах злокачественных новообразований обнаружено не было [13]. Американское агентство по охране окружающей среды, рассмотрев всю имевшуюся на тот момент информацию, пришло к выводу, что воздействие хлороформа в поставляемой населению хозяйственно-питьевой воде ниже «порогового» уровня, который вызывает повреждение клеток, и вряд ли увеличивает риск развития рака: «В то время как хлороформ канцерогенен в высокой дозе, воздействие ниже определенного уровня доз, скорее всего, не будет представлять никакого риска развития онкологических заболеваний для человека» [14]. В докладе Международной программы по химической безопасности (МПХБ-2000) также констатируется, что риски для здоровья от ППД на тех уровнях, в которых они встречаются в хозяйственно-питьевой воде, чрезвычайно малы по сравнению с рисками, связанными с недостаточной дезинфекцией [15]. Таким образом, важно, чтобы дезинфекция не была поставлена под угрозу при попытке контролировать ТГМ и подобные им побочные продукты. При этом не отрицается важность постоянного контроля ППД.

Хлорсодержащие химические агенты. В связи с существующей конкуренцией в области создания средств дезинфекции воды имеют место попытки внедрения таких методов, применение которых не сопровождалось бы образованием высоких концентраций ППД. Например, хлорамины предлагалось использовать вместо хлора, чтобы уменьшить образование хлорированных побочных продуктов и устранить некоторые проблемы со вкусом и запахом. Обсуждая применение хлораминов, следует обратить внимание на их способность негативно влиять на систему кроветворения [1], что проявляется лишь при превышении безопасного уровня концентрации. Хлорамины уступают в качестве обеззараживающего средства хлору, применяемому в чистом виде. Этот недостаток в известной степени компенсируется тем, что они обладают более высокой химической устойчивостью и в этом плане более предпочтительны в качестве

вторичного дезинфицирующего средства для длинных линий распределения, чтобы не увеличивать до высоких уровней содержание в них менее стабильного свободного хлора. Между тем не только молекулярный хлор, но и все хлорсодержащие химические дезинфицирующие средства образуют различные побочные продукты в процессе обеззараживания воды, содержащей органические вещества. Хлорамины сопутствуют свободный хлор и свободный бром. Поэтому здесь также возможно образование тех же ТГМ, какие возникают при хлорировании, хотя и в более низких концентрациях [4–8, 15].

Диоксид хлора (ClO_2) является высокоактивным дезинфицирующим агентом, который легко получить непосредственно на объектах водоподготовки если смешать в растворе хлорит натрия и молекулярный хлор. Как вещество второго класса опасности, ClO_2 может оказывать негативное влияние на репродуктивную функцию: обладает эмбриотоксическим действием, угнетает образование гормонов щитовидной железы, повреждает эритроциты, снижает уровень гемоглобина [1]. ClO_2 имеет окислительно-восстановительный потенциал в 1,4 раза выше, чем у хлора, и, следовательно, как обеззараживающее средство, обладает более высокой антимикробной активностью и способностью к ликвидации постороннего вкуса и запаха, а как селективный окислитель может быть использован для окисления марганца и некоторых устойчивых к свободному хлору органических соединений. При этом он не образует органических хлорированных побочных продуктов. Однако некоторые неорганические ППД при обработке диоксидом хлора все же образуются. К их числу можно отнести хлорит и хлорат. Кроме того, ClO_2 при солнечном свете может превращать бромид в бромат.

Обработка воды озоном (озонирование). Химическим агентом дезинфекции, чье применение не приводит к образованию ППД, характерных для хлорирования, является озон (O_3), один из самых сильных доступных окислителей и к тому же эффективное дезинфицирующее средство. Он генерируется на месте при очистке воды путем пропускания сухого кислорода или воздуха через систему высоковольтных электродов. Между тем O_3 не гарантирует отсутствия побочных продуктов окисления, которые никак не связаны с хлором. ППД, образующиеся в результате озонирования воды, включают простые альдегиды, низкомолекулярные алифатические кислоты, некоторые кетокислоты, гидроксикислоты, органические пероксиды и бензольные поликарбоновые кислоты. При озонировании образуются более 80 ППД, не менее опасных, чем при хлорировании: альдегиды, кетоны, органические кислоты, бромсодержащие ТГМ (включая бромформ), броматы (в присутствии бромидов), пероксиды, бромуксусная кислота и др. [16–20]. Формальдегид, являющийся наиболее типичным продуктом, который образуется при обеззараживании воды озоном, а также пероксиды могут быть устранены путем взаимодействия

с другими компонентами, содержащимися в воде. Однако при озонировании воды, содержащей повышенное количество бромидов, происходит окисление последнего до гипобромной кислоты. Та, в свою очередь, реагирует с органическими веществами, исходно присутствующими в природной воде, и образуются бромированные органические побочные продукты. Таким путем при стандартной концентрации озона и обычных значениях pH примерно 7 % бромидов в исходной воде преобразуется в общий органический бром. Образование последнего увеличивается при высоких уровнях бромидов, низком pH и высокой дозе озона. Обработка воды озоном в ряде случаев предпочтительна в качестве этапа, предшествующего хлорированию. Поскольку озон разрушает прекурсоры ТГМ в воде, потребность в хлоре уменьшается с преозонированием [21–26]. Однако на процесс сильно влияет реакция среды. После озонирования с последующим хлорированием при низком pH образуется существенно меньше ТГМ. В системах хлорирования с высоким pH ($\text{pH} > 8,5$) можно наблюдать явное увеличение образования ТГМ. С другой стороны, озон разрушает крупные органические соединения до небольших молекул, которые могут усиливать рост микроорганизмов в распределительных системах. В результате возникает потребность во вторичной дезинфекции хлорсодержащими соединениями, что неизбежно приводит к образованию соответствующих ППД.

Ультрафиолетовое излучение (UV-излучение). В контексте проблемы выбора наиболее безопасного метода водоочистки имеются публикации по побочным продуктам, образующимся при применении факторов физической природы [27–30]. Например, UV-излучение, генерируемое ртутными дуговыми лампами, является физическим методом дезинфекции, который эффективно инактивирует многие патогенные микроорганизмы, образуя между тем некоторое количество ППД. Например, UV-обработка поверхностных вод при определенных условиях влечет за собой ряд сопутствующих реакций, в результате которых бромат может быть восстановлен до бромида. Все формы трансформации брома, как органические, так и неорганические, образующиеся в процессе обеззараживания воды, могут проявлять канцерогенное действие и относятся ко 2-му классу опасности. Однако в исследовании, проведенном American Water Works Association для оценки влияния ртутных ламп низкого давления на образование побочных продуктов, ни в одном из образцов грунтовых вод не наблюдалось образования побочных продуктов брома [31]. Кроме того, ранее в образцах, содержащих бромат, не обнаружены изменения концентраций брома под действием UV. Дело в том, что бромат поглощает UV-излучение только в диапазоне 200–240 нм, а при отсутствии этих полос в спектре излучения ламп бромат не восстанавливается до бромида. Поэтому данная реакция не может быть сенсибилизирована ртутными лампами низкого давления. Лампы среднего давления, содержащие в своих спектрах

означенные полосы излучения, способны инициировать эту реакцию. Теми же исследователями было отмечено, что UV-излучение все же образует низкие уровни формальдегида в большинстве проб поверхностных вод. Наиболее высокие концентрации формальдегида были обнаружены в неочищенных поверхностных водах. Очевидно, в рассматриваемом варианте действие UV на воду может приводить к образованию озона или радикальных окислителей, т. к. формальдегид является распространенным побочным продуктом именно озонирования. Образование ППД под действием UV-излучения опосредовано образованием озона. Как известно, озон сопутствует работе бактерицидных ламп. Таким образом, ППД при данном способе обеззараживания воды являются третичными продуктами. Вторичным является озон.

В методике очистки воды *электроимпульсным воздействием* в качестве одного из обеззараживающих факторов также образуется озон. Синтез последнего происходит в электроразрядном блоке, который представляет собой «мокрый озонатор», т. к. O_3 в данном случае производится не в потоке сухого воздуха, а непосредственно в очищаемой воде. В связи с этим можно предполагать возникновение некоторого количества ППД, характерных для традиционной методики озонирования, значительная часть которых разрушается совместным электрическим и ударным воздействием [32].

В конце XX в. были разработаны стационарные генераторы, осуществляющие *электрохимический синтез влажной газообразной смеси оксидантов* для обеззараживания воды, которые производят агенты дезинфекции в ходе самого процесса обеззараживания, используя электролитический процесс в растворе поваренной соли. Цель разработки состояла в том, чтобы исключить применение газообразного хлора и обезопасить процесс очистки воды. Однако в составе образующейся влажной газообразной смеси оксидантов присутствуют хлор, диоксид хлора и озон. Между тем изготовителями подобных генераторов декларируется, что в установках данного типа исключено образование побочных продуктов хлорирования и озонирования [33]. Специалисты подвергают эту точку зрения сомнению, поскольку считают, что в ходе электролитического процесса ППД могут присутствовать, но трудны для мониторинга и контроля в данных условиях [34].

Технология ионного обмена (ИО) основана на способности безвредных ионов, сорбированных на поверхности частиц синтетической смолы, обмениваться на ионы загрязняющих воду веществ. С помощью данной технологии может быть удален целый ряд неорганических загрязнителей: нитрат, мышьяк, селен, барий, радий, свинец, фторид и хроматы [35]. На первый взгляд ИО является идеальным методом очистки воды от любых диссоциирующих агентов. Однако загрязнения концентрируются на смоле, которая периодически должна подвергаться регенерации для многократного использования [36].

В процессе регенерации загрязнители поступают в сточные воды. Именно из-за потока отходов, образующихся в результате этого процесса, возникают проблемы с применением технологии ИО в больших масштабах. Объем потока сточных вод невелик и может составлять всего от 2 до 5 % от объема очищенной воды, однако в нем содержатся концентрированные кислоты (HCl), основания (NaOH) или соли (NaCl) в диапазоне от 1 до 3 М. Кроме того, поток отходов содержит высокую концентрацию загрязняющего вещества, удаляемого из воды (например, NO_3^- , HAsO_4^{2-} , Pb^{2+} и т. д.). Эти компоненты сложно рассматривать в качестве ППД технологии ИО, поскольку из хозяйственно-питьевой воды они удалены. Однако их поступление в стоки приводит к вторичному загрязнению окружающей среды. Невозможность избавиться от потока отходов является главным препятствием для широкого внедрения технологии ИО на крупных водочистных сооружениях.

Проблема загрязнения окружающей среды актуализируется и в связи с применением систем очистки воды, основанных на явлении *обратного осмоса* (ОО). В таких системах используется мембрана с пористой структурой. При соответствующих размерах пор такие мембраны могут задерживать все взвешенные и коллоидные загрязнения и до 80–99,5 % компонентов истинных растворов [37]. Как правило, в промышленных установках используются мембраны с диаметром пор 0,0001 мк [38]. При прохождении очищаемой воды через такую полупроницаемую мембрану происходит разделение исходного потока на две составляющие — пермеат, представляющий собой прошедшую сквозь мембрану очищенную воду, и концентрат — воду с увеличенным по сравнению с исходным содержанием солей, коллоидов и задержанной взвесью. Кроме взвешенных и коллоидных веществ полупроницаемые мембраны задерживают гидратированные молекулы истинно растворенных веществ, основные природные солеобразующие ионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^-) и ионы микроэлементов, включая радионуклиды. Таким образом, ОО является высокоэффективным методом очистки воды практически от всех видов загрязнений. Однако образующийся в качестве побочного продукта ОО концентрат задержанных примесей изливается в окружающую среду и становится фактором ее загрязнения.

Баромембранные технологии, не связанные с использованием ОО, — это системы ультра- и нанофильтрации. Они надежно удаляют из воды практически все загрязнения органической природы. Однако одним из ограничивающих факторов их применения является образование на поверхности фильтров загрязнений, которые невозможно удалить путем обычной гидравлической промывки. В силу этого химическая промывка является неотъемлемым этапом работы любых баромембранных систем очистки [34]. Удаленный с поверхностей фильтров осажденный материал выводится в стоки и становится фактором вторичного загрязнения окружающей среды.

Наиболее перспективными для совершенствования методов водоподготовки считаются такие подходы к обеззараживанию воды, которые позволяют использовать новые материалы, обладающие ранее неизвестными свойствами, обеспечивающими принципиальное улучшение качества очистки и ускоряющие темпы ее осуществления. Такие свойства обнаруживаются на уровне наноструктур, а их использование в практических целях осуществимо с применением *методов нанотехнологии*. При этом следует различать нанофильтрационные мембраны, задерживающие частицы с наноразмерами, и наноструктурированные мембраны, построенные на основе или с использованием наноматериалов, например углеродных нанотрубок. К наноматериалам и объектам нанотехнологии относят структуры, которые имеют размеры менее 100 нм хотя бы в одном измерении. В процессе эксплуатации *наноструктурированные мембраны*, как и любые баромембраны, нуждаются в периодической химической регенерации. Например, регенерация нанотрубок в действующих моделях таких мембран осуществляется промывкой кислотным раствором. При pH 2,0 степень извлечения задержанных тяжелых металлов из углеродных нанотрубок составляет 90–100 %. При этом адсорбционная емкость после регенерации остается стабильной. Однако основная опасность, связанная с применением материалов, функционализированных наночастицами (НЧ), заключается в том, что последние способны отделяться от подложки и поступать в окружающую среду, где они могут накапливаться в течение длительного времени. Сами по себе НЧ состоят из материалов, которые на уровне макротел относятся к нетоксичным. Потенциальный токсический эффект в основном зависит от размера и формы соответствующих нанoadсорбентов, существенно влияющих на их свойства, а также от химических стабилизаторов и свойств поверхности, которая должна надежно удерживать наноконцент. Между тем структурные изменения, а также реакции тканей и клеток на воздействие НЧ остаются недостаточно изученными [39]. Малый размер НЧ позволяет им легко проникать в дыхательную систему, нанося ущерб здоровью человека. Установлено, что НЧ способны преодолевать гематоэнцефалический барьер и оказывать на центральную нервную систему пока еще не изученное, но, вероятнее всего, негативное воздействие [40]. Приводятся аргументы, свидетельствующие, что углеродные нанотрубки при вдыхании способны вызывать повреждение легких [41].

Приходится констатировать, что применение большинства как традиционных, так и перспективных методов обеззараживания воды сопряжено с образованием ППД, являющихся факторами экологической опасности. Изучив публикации, в которых обсуждается данная проблема, и встречаемость ссылок на соответствующие литературные источники, можно условно представить степень опасности ППД и токсичных отходов при разных способах дезинфекции воды в виде трехбалльной шкалы (таблица).

Таблица. Степень опасности и два направления распределения побочных продуктов дезинфекции при разных методах очистки воды

Технология дезинфекции	Химические факторы опасности по трехбалльной шкале	
	в очищенной воде	в составе технологических стоков
Газообразный хлор	+++	–
Хлорсодержащие соединения	++	–
Озон	++	–
Электроимпульсная обработка	+	+
Ультрафиолетовое излучение	+	+
Электрохимический синтез смеси оксидантов	+	+
Ионный обмен	–	++
ОО	–	++
Ультрафильтрация	–	+
Наночаистота	–	+
Фильтрация через наноструктурированные мембраны	+++	+++

Примечание. +++ признак выражен максимально; ++ признак выражен умеренно; + признак выражен незначительно; – признак отсутствует.

При этом различные химические факторы опасности могут присутствовать непосредственно в хозяйственно-питьевой воде или в составе стоков, содержащих удаленные из воды загрязнители.

Из результатов сравнительного анализа следует, что при применении технологий ОО, а также ультра- и наночаистота ППД в очищенной воде не образуются. Таким образом, указанные способы очистки и обеззараживания воды являются наиболее безопасными при полевом водообеспечении, когда основными приоритетами являются здоровье, трудо- и боеспособность военнослужащих.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время при всем разнообразии методов дезинфекции обеззараживание воды с использованием хлорсодержащих препаратов является основным, остается эффективным и экономически выгодным способом. Благодаря активному микробиоцидному эффекту он уничтожает большинство патогенных микроорганизмов, а следовательно, обеспечивает эпидемиологическую безопасность воды, позволяет консервировать воду хозяйственно-питьевого назначения. При этом в воде после обработки хлорсодержащими препаратами могут присутствовать более 500 ППД, наиболее опасными из них являются ТГМ.

Применение некоторых сравнительно новых методов также не обходится без образования вторично образующихся соединений, концентрированных растворов загрязнений и продуктов деградации самих фильтрующих мембран. Ряд методов дезинфекции, таких, например, как озонирование и UV-обработка, часто вынужденно

дополняется на завершающих этапах хлорированием. Поскольку концентрации ППД зависят от параметров процесса очистки, решение проблемы безопасности хозяйственно-питьевой воды должно осуществляться путем строгого соблюдения условий технологического процесса, а не запрещением применения тех или иных методик.

Наиболее перспективным для совершенствования водоподготовки в полевых условиях, имеющим наименьшее количество ППД, является подход к обеззараживанию воды, который включает две альтернативные системы: ОО и ультрафильтрацию (наночаистота) с возможностью выбора одного из этих вариантов очистки.

Таким образом, исходя из отечественного и зарубежного опыта в области технологий очистки воды установлено, что необходимо развивать модульный подход в совершенствовании систем обеззараживания с использованием комбинаций очистных модулей разных типов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Финансирование данной работы не проводилось. Поисково-аналитическая работа проведена на личные средства авторского коллектива.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Этическая экспертиза. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов изучения.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздова Е.В., Бурая В.В., Гирина В.В., и др. К вопросу об образовании побочных продуктов дезинфекции питьевой воды (регламентируемых и эмерджентных), их генотоксических и канцерогенных свойствах: обзор проблемы и направления дальнейших исследований. В сб.: Здоровье и окружающая среда. Сборник научных трудов. Вып. 26. Минск: РНМБ, 2016. С. 12–16.
2. Кириленко В.И., Руднев И.М. Современные средства полевого водообеспечения войск // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных сил Российской Федерации. 2018. № 4, вып. 10. С. 98–107.
3. Hrudey S.E., Charrois J.W.A. Disinfection By-products and Human Health: Relevance to Human Health. Vol. 11. IWA Publishing, 2012. P. 213–281. DOI: 10.2166/9781780400624
4. Drinking water requirements for states and public water systems: Stage 1 and Stage 2 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rules. Suppl. 2. EPA 816-F-10-080. Washington, DC, USA: Office of Water, 2017.
5. Six-year review 3 technical support document for disinfectants/disinfection by products rules. EPA 810-R-16-012. Washington, DC, USA: Office of Water, 2016.
6. McGuire M.J. The chlorine revolution: water disinfection and the fight to save lives. Zeilig Nancy, editor. 1st ed. Denver, Colorado, USA: AWWA, 2013.
7. Hrudey S.E., Backer L.C., Humpage A.R., et al. Evaluating evidence for association of human bladder cancer with drinking-water chlorination disinfection by-products // J Toxicol Environ Health B Crit Rev. 2015. Vol. 18, No. 5. P. 213–241. DOI: 10.1080/10937404.2015.1067661
8. Beretta S., Vivaldo T., Morelli M., Zuccotti G.V. Swimming pool-induced asthma // J. Investing Allergo. Clin. Immunol. 2011. Vol. 21, No. 3. P. 240–241.
9. Moreira A., Palmares C., Lopes C., Delgado L. Airway vascular damage in elite swimmers // Respir. Med. 2011;105(11):1761–1765. DOI: 10.1016/j.rmed.2011.05.011
10. Voisin C., Sardella A., Marcucci F., Bernard A. Infant swimming in chlorinated pools and the risk of bronchiolitis, asthma and allergy // Eur. Respir. J. 2010. Vol. 36, No. 1. P. 41–47. DOI: 10.1183/09031936.00118009
11. Rutala W.A., Weber D.J., Weinstein R.A., et al. Guideline for disinfection and sterilization in healthcare facilities, 2008. CDC. 2019. P. 163. Available at: <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/disinfection/> (accessed 08.06.22.).
12. Lehtola M.J., Miettinen I.T., Keinänen M.M., et al. Microbiology, chemistry and biofilm development in a pilot drinking water distribution system with copper and plastic pipes // Water Res. 2004. Vol. 38, No. 17. P. 3769–3779. DOI: 10.1016/j.watres.2004.06.024
13. Butterworth T., Faugier J., editors. Clinical Supervision and Mentorship in Nursing. Springer Science+Business Media, 2013. 246 p.
14. Oshiro RK. Method 1600: Enterococci in water by membrane filtration using membrane-enterococcus indoxyl-β-D-Glucoside agar. EPA-821-R-09-016. Washington, DC, USA: Office of Water, 2009. 42 p.
15. Disinfectants and disinfection byproducts rule (Stage 1 DBPR). EPA 816 F-02-021. Washington, DC, USA: Office of Water, 2001.
16. Chuang Y.H., Tung H.H. Formation of trichloronitromethane and dichloroacetonitrile in natural waters: precursor characterization, kinetics and interpretation // J. Hazard. Mater. 2015. Vol. 283. P. 218–226. (Engl) DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.09.285
17. Deng L., Huang C.H., Wang Y.L. Effects of combined UV and chlorine treatment on the formation of trichloronitromethane from amine precursor // Environ. Sci. Technol. 2014. Vol. 48, No. 5. P. 2697–2705. DOI: 10.1021/es404116n
18. Dotson A.D., Keen V.O., Metz D., Linden K.G. UV/H(2)O(2) treatment of drinking water increases post-chlorination DBP formation // Water Research. 2010, Vol. 44, No. 12. P. 3703–3713. DOI: 10.1016/j.watres.2010.04.006
19. Krasner S.W., Weinberg H.S., Richardson S.D., et al. Occurrence of a new generation of disinfection byproducts // Environ. Sci. Technol. 2006. Vol. 40, No. 23. P. 7175–7185. DOI: 10.1021/es060353j
20. Li J., Blatchley E.R. UV photodegradation of inorganic chloramines // Environ. Sci. Technol. 2009. Vol. 43, No. 1. P. 60–65. DOI: 10.1021/es8016304
21. Plewa M.J., Wagner E.D., Jazwierska P., et al. Halonitromethane drinking water disinfection byproducts: chemical characterization and mammalian cell cytotoxicity and genotoxicity // Environ. Sci. Technol. 2004. Vol. 38, No. 1. P. 3862–3868. DOI: 10.1021/es0304771
22. Echigo S., Minear R.A. Kinetics of the reaction of hypobromous acid and organic matters in water treatment processes // Environ. Sci. Technol. 2006. Vol. 53, No. 11. P. 235–243. DOI: 10.2166/wst.2006.358
23. Hua G., Reckhow D. Determination of TOCl, TOBr, and TOI in drinking water by pyrolysis and off-line ion chromatography // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2006. Vol. 384, No. 2. P. 495–504. DOI: 10.1007/s00216-005-0214-3
24. Du J.R., Peldszus S., Huck P.M., Feng X.S. Modification of poly(vinylidene fluoride) ultrafiltration membranes with poly(vinyl alcohol) for fouling control in drinking water treatment // Water Res. 2009. Vol. 43, No. 8. P. 4559–4568. DOI: 10.1016/j.watres.2009.08.008
25. Hammes F., Salhi E., Koster O., et al. Mechanistic and kinetic evaluation of organic disinfection by-product and assimilable organic carbon (AOC) formation during the ozonation of drinking water // Water. Res. 2006. Vol. 40, No. 12. P. 2275–2286. DOI: 10.31031/cjmi.2019.02.000543
26. Lehman L.L. Application of ceramic membranes with pre-ozonation for treatment of secondary wastewater effluent // Water. Res. 2009. Vol. 43, No. 7. P. 2020–2028. DOI: 10.1016/j.watres.2009.02.003
27. Montgomery Watson Consulting Engineering. Mathematical modeling of the formation of THMs and HAA in Chlorinated Natural Waters, Denver, Colorado, USA. Final report reported for AWWA. 1993.
28. APHA, AWWA WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 24th ed. Washington, USA. 2012.
29. Clarke S., Bettin W. Ultraviolet light disinfection in the use of individual water purification devices // Environmental science. 2006. DOI: 10.21236/ada453967
30. Vilhunen S., Sarkka H., Sillanpaa M. Ultraviolet light-emitting diodes in water disinfection // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2009. Vol. 16, No. 4. P. 439–442. DOI: 10.1007/s11356-009-0103-y
31. Tarhan G. Which disinfection method is effective for water disinfection // Cohesive J. Microbiol. Infect. Dis. 2019. Vol. 2, Issue 4. P. 1–6. DOI: 10.31031/CJMI.2019.02.000544
32. Яворский Н.А., Корнев Я.И., Преис С.В., и др. Импульсный барьерный разряд как метод обработки воды: Активные частицы-окислители в водо-воздушном потоке // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309, № 2. С. 108–113.

33. Бутко М.П., Тиганов В.С., Фролов В.С. Альтернатива традиционным дезинфицирующим средствам // Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2012. № 1(7). С. 34–37.
34. Zhao D., Qiu L., Song J., et al. Efficiencies and mechanisms of chemical cleaning agents for nanofiltration membranes used in produced wastewater desalination // *Sci. Total Environ.* 2019. Vol. 652. P. 256–266. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.221
35. Матус Л.И., Нефедьева Е.Э. Конспект лекций по дисциплине «Методы очистки сточных вод». Волгоград: Волгоградский ГТУ, 2019.
36. Чигаев И.Г., Комарова Л.Ф. Исследование нанофильтрации и ионного обмена как комплексных методов очистки природных подземных вод // Вестник Технологического университета. 2019. Т. 22, № 4. С. 99–102.
37. Первов А.Г. Современные высокоэффективные технологии очистки питьевой и технической воды с применением мембран: обратный осмос, нанофильтрация, ультрафильтрация. М.: МГСУ, 2009.
38. Арбатсков А.Н. Очистка воды с помощью обратного осмоса // Сборник материалов заочн. научн.-практ. конф. 2020. С. 253–261.
39. Шевченко Д.В., Перепеченова Ю.А. Влияние наночастиц алюминия на респираторную систему белых беспородных лабораторных крыс после однократного интрахеального введения. В сб.: Актуальные проблемы биомедицины. Сборник тезисов XXVII Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием. Санкт-Петербург, 25–26 марта 2021 г. СПб.: РИЦ ПСПбГМУ, 2021. С. 254–255.
40. Oberdörster G., Stone V., Donaldson K. Toxicology of nanoparticles: a historical perspective // *Nanotoxicology.* 2007. Vol. 1, No. 1. P. 2–25. DOI: 10.1080/17435390701314761
41. Bonner J.C. Carbon nanotubes as delivery systems for respiratory disease: do the dangers outweigh the potential benefits? // *Expert Rev. Respir. Med.* 2011. Vol. 5, No. 6. P. 779–787. DOI: 10.1586/ers.11.72

REFERENCES

1. Drozdova EV, Buraya VV, Girina VV, et al. On the issue of the formation of by-products of drinking water disinfection (regulated and emergent), their genotoxic and carcinogenic properties: a review of the problem and directions for further research. In: *Zdorov'e I okruzhayushchaya sreda.* Collection of scientific papers. Issue. 26. Minsk: RNMB Publ.; 2016. P. 12–16. (In Russ.)
2. Kirilenko VI, Rudnev IM. Modern means of field water supply of troops. *Scientific problems of material support of armed forces of the Russian Federation.* 2018;(4(10)):98–107. (In Russ.)
3. Hrudey SE, Charrois JWA. *Disinfection By-products and Human Health: Relevance to Human Health.* Vol. 11. IWA Publishing; 2012. P. 213–281. DOI: 10.2166/9781780400624
4. *Drinking water requirements for states and public water systems: Stage 1 and Stage 2 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rules.* Suppl. 2. EPA 816-F-10-080. Washington, DC, USA: Office of Water; 2017.
5. *Six-year review 3 technical support document for disinfectants/disinfection by products rules.* EPA 810-R-16-012. Washington, DC, USA; Office of Water. 2016.
6. McGuire MJ. *The chlorine revolution: water disinfection and the fight to save lives.* Zeilig Nancy, editor. 1st ed. Denver, Colorado, USA: AWWA; 2013.
7. Hrudey SE, Backer LC, Humpage AR, et al. Evaluating evidence for association of human bladder cancer with drinking-water chlorination disinfection by-products. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev.* 2015;18(5):213–241. DOI: 10.1080/10937404.2015.1067661
8. Beretta S, Vivaldo T, Morelli M, Zuccotti GV. Swimming pool-induced asthma. *J Investing Allergo Clin Immunol.* 2011;21(3):240–241.
9. Moreira A, Palmares C, Lopes C, Delgado L. Airway vascular damage in elite swimmers. *Respir Med.* 2011;105(11):1761–1765. DOI: 10.1016/j.rmed.2011.05.011
10. Voisin C, Sardella A, Marcucci F, Bernard A. Infant swimming in chlorinated pools and the risk of bronchiolitis, asthma and allergy. *Eur Respir J.* 2010;36(1):41–47. DOI: 10.1183/09031936.00118009
11. Rutala WA, Weber DJ, Weinstein RA, et al. *Guideline for disinfection and sterilization in healthcare facilities, 2008.* CDC. 2019. P. 163. Available at: <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/disinfection/> (accessed 08.06.22).
12. Lehtola MJ, Miettinen IT, Keinänen MM, et al. Microbiology, chemistry and biofilm development in a pilot drinking water distribution system with copper and plastic pipes. *Water Res.* 2004;38(17):3769–3779. DOI: 10.1016/j.watres.2004.06.024
13. Butterworth T, Faugier J, editors. *Clinical Supervision and Mentorship in Nursing.* Springer Science+Business Media; 2013. 246 p.
14. Oshiro RK. *Method 1600: Enterococci in water by membrane filtration using membrane-enterococcus indoxyl-β-D-Glucoside agar.* EPA-821-R-09-016. Washington, DC, USA: Office of Water; 2009. 42 p.
15. *Disinfectants and disinfection byproducts rule (Stage 1 DBPR).* EPA 816 F-02-021. Washington, DC, USA: Office of Water; 2001.
16. Chuang YH, Tung HH. Formation of trichloronitromethane and dichloroacetonitrile in natural waters: precursor characterization, kinetics and interpretation. *J Hazard Mater.* 2015;283:218–226. (Engl) DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.09.285
17. Deng L, Huang CH, Wang YL. Effects of combined UV and chlorine treatment on the formation of trichloronitromethane from amine precursor. *Environ Sci Technol.* 2014;48(5):2697–2705. DOI: 10.1021/es404116n
18. Dotson AD, Keen VO, Metz D, Linden KG. UV/H(2)O(2) treatment of drinking water increases post-chlorination DBP formation. *Water Research.* 2010;44(12):3703–3713. DOI: 10.1016/j.watres.2010.04.006
19. Krasner SW, Weinberg HS, Richardson SD, et al. Occurrence of a new generation of disinfection byproducts. *Environ Sci Technol.* 2006;40(23):7175–7185. DOI: 10.1021/es060353j
20. Li J, Blatchley ER. UV photodegradation of inorganic chloramines. *Environ Sci Technol.* 2009;43(1):60–65. DOI: 10.1021/es8016304
21. Plewa MJ, Wagner ED, Jazwierska P, et al. Halonitromethane drinking water disinfection byproducts: chemical characterization and mammalian cell cytotoxicity and genotoxicity. *Environ Sci Technol.* 2004;38(1):3862–3868. DOI: 10.1021/es0304771
22. Echigo S, Minear RA. Kinetics of the reaction of hypobromous acid and organic matters in water treatment processes. *Environ Sci Technol.* 2006;53(11):235–243. DOI: 10.2166/wst.2006.358
23. Hua G, Reckhow D. Determination of TOCl, TOBr, and TOI in drinking water by pyrolysis and off-line ion chromatography.

Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2006;384(2):495–504. DOI: 10.1007/s00216-005-0214-3

24. Du JR, Peldszus S, Huck PM, Feng XS. Modification of poly(vinylidene fluoride) ultrafiltration membranes with poly(vinyl alcohol) for fouling control in drinking water treatment. *Water Res*. 2009;43(18):4559–4568. DOI: 10.1016/j.watres.2009.08.008

25. Hammes F, Salhi E, Koster O, et al. Mechanistic and kinetic evaluation of organic disinfection by-product and assimilable organic carbon (AOC) formation during the ozonation of drinking water. *Water Res*. 2006;40(12):2275–2286. DOI: 10.31031/cjmi.2019.02.000543

26. Lehman LL. Application of ceramic membranes with pre-ozonation for treatment of secondary wastewater effluent. *Water Res*. 2009;43(7):2020–2028. DOI: 10.1016/j.watres.2009.02.003

27. Montgomery Watson Consulting Engineering. *Mathematical modeling of the formation of THMs and HAA in Chlorinated Natural Waters, Denver, Colorado, USA*. Final report reported for AWWA. 1993.

28. APHA, AWWA WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 24th ed. Washington, USA. 2012.

29. Clarke S, Bettin W. Ultraviolet light disinfection in the use of individual water purification devices. *Environmental science*. 2006. DOI: 10.21236/ada453967

30. Vilhunen S, Sarkka H, Sillanpaa M. Ultraviolet light-emitting diodes in water disinfection. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2009;16(4):439–442. DOI: 10.1007/s11356-009-0103-y

31. Tarhan G. Which disinfection method is effective for water disinfection. *Cohesive J Microbiol Infect Dis*. 2019;2(4):1–6. DOI: 10.31031/CJMI.2019.02.000544

32. Yavorskiy NA, Kornev YA, Preys SV, et al. The pulse barrier category as a method of processing of water: Active particles-oxidizers in a water-air stream. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2006;309(2):108–113. (In Russ.)

33. Butko MP, Tiganov VS, Frolov VS. Alternative to traditional disinfectants. *Problemy veterinarnoy sanitarii, gigienny I ekologii*. 2012;1(7):34–37. (In Russ.)

34. Zhao D, Qiu L, Song J, et al. Efficiencies and mechanisms of chemical cleaning agents for nanofiltration membranes used in produced wastewater desalination. *Sci Total Environ*. 2019;652:256–266. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.221

35. Matus LI, Nefed'eva EE. *Konspekt lektsiy po distsipline "Metody ochistki stochnykh vod"*. Volgograd: Volgogradskiy GTU Publ.; 2019. (In Russ.)

36. Chigaev IG, Komarova LF. A study of nano-filtration and ion exchange as complex methods for natural underground water treatment. *Bulletin of the Technological University*. 2019;22(4):99–102. (In Russ.)

37. Pervov AG. *Modern highly efficient technologies for purification of drinking and industrial water using membranes: reverse osmosis, nanofiltration, ultrafiltration*. Moscow: MGSU Publ.; 2009. (In Russ.)

38. Arbatskov AN. Water purification using reverse osmosis. *Sbornik materialov zaochn. nauchn.-prakt. konferentsii*. 2020. P. 253–261. (In Russ.)

39. Shevchenko DV, Perepechenova YuA. Effect of aluminum nanoparticles on the respiratory system of outbred laboratory rats after a single intracheal injection. In: *Aktual'nye problemy biomeditsiny*. Collection of abstracts of the XXVII All-Russian Conference of Young Scientists with International Participation. Saint Petersburg, 25–26 March 2021. Saint Petersburg: RITs PSPbGMU Publ.; 2021. P. 254–255. (In Russ.)

40. Oberdörster G, Stone V, Donaldson K. Toxicology of nanoparticles: a historical perspective. *Nanotoxicology*. 2007;1(1):2–25. DOI: 10.1080/17435390701314761

41. Bonner JC. Carbon nanotubes as delivery systems for respiratory disease: do the dangers outweigh the potential benefits? *Expert Rev Respir Med*. 2011;5(6):779–787. DOI: 10.1586/ers.11.72

ОБ АВТОРАХ

***Жанна Вячеславовна Плахотская**, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории (войскового и рационального питания) научно-исследовательского отдела (питания и водоснабжения) научно-исследовательского центра; адрес: Россия, 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9045-721X>; eLibrary SPIN: 8919-5585; Author ID: 872745; e-mail: Zannapl@yandex.ru

Владимир Павлович Андреев, канд. биол. наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории (войскового и рационального питания) научно-исследовательского отдела (питания и водоснабжения) научно-исследовательского центра; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9072-2845>; Scopus Author ID: 57224705575; eLibrary SPIN: 3098-4549; Author ID: 496119; e-mail: vpandreev@mail.ru

Андрей Владимирович Кривцов, майор медицинской службы начальник научно-исследовательской лаборатории (медико-биологических проблем водоснабжения войск) научно-исследовательского отдела (питания и водоснабжения) научно-исследовательского центра; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5919-2850>; eLibrary SPIN: 4841-4270; Author ID: 202244; e-mail: crixus78@yandex.ru

AUTHORS' INFO

***Zhanna V. Plakhotskaya**, researcher of the research laboratory (military and rational nutrition) of the research department (nutrition and water supply) of the research center; address: 6, Akademika Lebedeva str., Saint Peterburg, 194044, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9045-721X>; eLibrary SPIN: 8919-5585; Author ID: 872745; e-mail: Zannapl@yandex.ru

Vladimir P. Andreev, Ph. D. (Biology), Associate Professor, Senior Researcher of the Research Laboratory (Military and Rational Nutrition) of the Research Department (Nutrition and Water Supply) of the Research Center; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9072-2845>; Scopus Author ID: 57224705575; eLibrary SPIN: 3098-4549; Author ID: 496119; e-mail: vpandreev@mail.ru

Andrey V. Krivtsov, Major of the Medical Service, Head of the Research Laboratory (Medical and Biological Problems of Water Supply to Troops) of the Research Department (Food and Water Supply) of the Research Center; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5919-2850>; eLibrary SPIN: 4841-4270; Author ID: 202244; e-mail: crixus78@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author