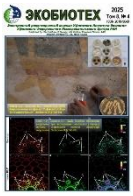
ЭКОБИОТЕХ
ISSN 2618-964X http://ecobiotech-journal.ru



УДК 574.64:574.635:504.064:504.054:628.3 UDC 574.64:574.635:504.064:504.054:628.3

Ускорение снижения концентраций бутилгликоля в пресной воде в присутствии макрофитов

Поклонов В.А.

Международный независимый эколого-политологический университет, Москва, Российская Федерация
E-mail: mr.poklonov@internet.ru

Аннотация

Обнаружено, что несколько видов макрофитов можно использовать для выведения бутилгликоля из воды. Это необходимо для проектирования биотехнологий (фиторемедиация) по очищению воды от поллютантов. Концентрации бутилгликоля составляли 10 мг/л (1000 ПДК-Предельно Допустимая Концентрация) и 20 мг/л (2000 ПДК). Температура инкубации 13-27°C, наблюдения продолжались 10 дней (240 ч). Автор изучал протекающее во времени уменьшение концентраций бутилгликоля в воде экспериментальных экосистем (микрокосмов), которое измеряли методом хромато-масс-спектрометрии в присутствии водных растений *Ceratophyllum demersum* L., *Elodea canadensis* M., *Utricularia vulgaris* L., инкубированных в микрокосмах. Впервые доказано, что в присутствии данных водных растений ускорялось снижение концентраций бутилгликоля по сравнению с контролем (водные системы без растений). Выявлен фиторемедиационный потенциал водных макрофитов. Обнаружена фитотоксичность бутилгликоля для *C. demersum*, *E. canadensis*, *U. vulgaris*. Установлено, что *E. canadensis* более чувствительна к бутилгликолю (до 95% погибших побегов), чем *C. demersum* и *U. vulgaris*. В присутствии *C. demersum* и *U. vulgaris* снижение концентраций бутилгликоля составило больше 85% процентов (по сравнению с контролем), во всех микрокосмах спустя 10 суток в опытах с обеими концентрациями (10 мг/л и 20 мг/л). Полученные результаты расширяют знания о фитотоксичности бутилгликоля и фиторемедиационном потенциале высших водных растений, что необходимо для разработки фитотехнологий по очищению воды от загрязнений.

Ключевые слова

фиторемедиация ◆ водные макрофиты ◆ бутилгликоль ◆ микрокосмы ◆ ксенобиотики ◆ химическое загрязнение ◆ фитотоксичность ◆ водные ресурсы ◆ загрязнение воды

Поступила в редакцию: 16.09.2025
Принято в печать: 12.11.2025

Acceleration in the decrease in the concentrations of butyl glycol in freshwater in the presence of aquatic macrophytes

Poklonov V.A.

International independent university of environmental & political sciences, Moscow, Russian Federation
E-mail: mr.poklonov@internet.ru

Abstract

In this study, the author found that numerous macrophyte species may be used to remove butyl glycol from water. This is crucial for developing biotechnologies for environmental cleansing. Butyl glycol concentrations were 10 mg/L (1000 MAC-Maximum Allowable Concentration) and 20 mg/L (2000 MAC). The incubation temperature kept between 13 and 27°C, with observations lasted 10 days (240 h). The content of butyl glycol in the water of experimental ecosystems (microcosms) in the presence of water plants plants (*Ceratophyllum demersum*, *Elodea canadensis*, *Utricularia vulgaris*) decreases with time. Aquatic macrophytes *C. demersum*, *E. canadensis*, and *U.* vulgaris were incubated in microcosms, and the reduction in butyl glycol content was measured using chromatography-mass spectrometry. Experiments demonstrated that the presence of aquatic plants resulted in a faster decline in butyl glycol concentrations when compared to control (water systems without plants). The phytoremediation potential of aquatic macrophytes has been revealed. The phytotoxicity of butyl glycol to macrophytes was discovered. It was discovered that *E. canadensis* is more susceptible to butyl glycol (up to 95% dead shoots) than *C. demersum* or *U. vulgaris*. After 10 days of exposure to *C. demersum* and *U. vulgaris*, butyl glycol concentrations in all microcosms decreased by more than 85% (relative to the control). The results contribute to a better understanding of butyl glycol phytotoxicity and aquatic macrophyte phytoremediation potential. This is required for the development of phytotechnologies for water purification from contaminants.

Keywords

phytoremediation ◆ aquatic macrophytes ◆ butyl glycol ◆ microcosms ◆ xenobiotics ◆ chemical pollution ◆ phytotoxicity ◆ water resources ◆ water pollution

Received: 16.09.2025
Accepted: 12.11.2025

Цитировать | Cite as

DOI: 10.31163/2618-964X/2025-39 EDN: SKUDUI

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение пресноводных водоемов является серьезной глобальной проблемой [Sousa *и др.* 2024]. Фиторемедиация — это процесс восстановления окружающей среды от загрязнения, основанный на использовании растений. При помощи этого процесса растения поглощают или разлагают загрязняющие вещества в наземной и водной среде. Это экологически чистая технология. Ее можно использовать в искусственных водно-болотных угодьях или гидропонных системах [Mustafa, Hayder 2021]. Искусственно созданные плавучие острова являются разновидностью искусственных водно-болотных угодий [Osti *и др.* 2020].

В этой статье показано, что водные макрофиты, которые могут использоваться в искусственных водно-болотных угодьях (для фиторемедиации), могут играть важную роль, которая может напрямую и косвенно способствовать стабилизации, секвестрации или деградации загрязняющих веществ в сточных водах.

Искусственные водно-болотные системы (фиторемедиационные системы) к настоящему времени можно считать эффективной технологией для удаления загрязняющих веществ, таких как взвешенные твердые частицы, органические вещества, патогены и т.д. Хотя большинство исследователей сходятся во мнении, что растения, как правило, полезны для очистки сточных вод в искусственных водно-болотных угодьях, практическое планирование и обслуживание фиторемедиационных систем все еще находится в зачаточном состоянии, поскольку соответствующие знания для руководства этими системами остаются скудными [Dordio *и др.* 2018].

Существует огромное количество макрофитов, которые использовались для фиторемедиации сточных вод [Hernández-Vásquez *и др.* 2024]. Макрофиты могут аккумулировать загрязняющие вещества, как корнями [Diepens *и др.* 2014], так и побегами. Макрофиты, которые могут расти как на суше, так и в воде, также эффективно используются для удаления загрязнений из сточных вод [Самодолов 2025]. Многие органические загрязняющие вещества поглощаются водными растениями [Li *и др.* 2023; Hernández-Vásquez *и др.* 2024; Khompun *и др.* 2024; Wang *и др.* 2024; Zazouli *и др.* 2024].

Экспериментальные сосуды (микрокосмы), которые будут использоваться в данной работе, хорошо зарекомендовали себя в опытах по изучению фиторемедиационного потенциала водных растений [Ciurli *и др.* 2009; Пухов *и др.* 2015; Тропин, Остроумов 2018; Поклонов 2019] и в определении токсичности различных веществ [Solomonova, Ostroumov 2007; Лубкова и др. 2015; Poklonov et al. 2021, 2024; Игнатенко 2022].

Одним из загрязняющих окружающую среду веществ является бутилгликоль (2-бутоксиэтанол, бутилцеллозольв, монобутиловый эфир этиленгликоля, бутилэфир). Изучение гликолей пользуется актуальностью, поскольку гликоли являются классом загрязняющих веществ. Гликоли опасны для окружающей среды, так как при биоразложении потребляют большое количество химического и биологического кислорода. Природные, рентабельные и экологически рациональные альтернативные методы переработки гликолей заключаются в том, что рядом с источником загрязнения заболачивают часть площади, засаживая ее водными растениями [Кашапова *и др.* 2015].

Цель работы – изучить фиторемедиационный потенциал макрофитов, ускорение деструкции бутилгликоля в воде тремя видами высших водных растений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В качестве тест-объектов использовались: *Ceratophyllum demersum* Carl Linnaeus, 1753 (Роголистник темно-зеленый, семейство: Роголистниковые-*Ceratophyllaceae* G.), *Elodea canadensis* Andre Michaux, 1803 (Элодея канадская, семейство: Водокрасовые-*Hydrocharitaceae* Juss.), *Utricularia vulgaris* Carl Linnaeus, 1753 (Пузырчатка обыкновенная, семейство: Пузырчатковые-*Lentibulariaceae* Rich.).

Водные растения (табл. 1) были собраны во Владимирской области на благополучной в экологическом отношении акватории (Средняя полоса России, на территории Крутовского заказника). Были промыты дистиллированной водой и помещены в экспериментальные пресноводные кюветы (микрокосмы).

Таблица 1. Состав микрокосмов

Номера микрокосмов, названия макрофитов	Добавка бутилгликоля 1000 ПДК, сырой вес побегов в граммах	Добавка бутилгликоля 2000 ПДК, сырой вес побегов в граммах
1A (*C. demersum*)	10	–
1B (*C. demersum*)	10.5	
1C (*C. demersum*)	–	12
1D (*C. demersum*)	–	12.2
2A (*E.canadensis*)	5	–
2B (*E.canadensis*)	5.2	–
2C (*E.canadensis*)	–	5.2
2D (*E.canadensis*)	–	5.3
3A (*U. vulgaris*)	20.1	–
3B (*U. vulgaris*)	20.2	–
3C (*U. vulgaris*)	–	20.9
3D (*U. vulgaris*)	–	21.9
4A (без макрофитов)	Бутилгликоль без макрофитов/ butyl glycol without plants	–
4B (без макрофитов)	Бутилгликоль без макрофитов/ butyl glycol without plants	–
4C (без макрофитов)	–	Бутилгликоль без макрофитов/ butyl glycol without plants
4D (без макрофитов)	–	Бутилгликоль без макрофитов/ butyl glycol without plants

Выбор растений *C. demersum* и *E. canadensis* связан с проведёнными ранее исследованиями. Известно, что они могут выдерживать определенные уровни загрязнения воды органическими растворителями, тяжелыми металлами и поверхностно-активными веществами. Высшие водные растения *C. demersum* и *E. canadensis* являются одними из самых распространенных в мире [Poklonov et al. 2018, 2021, 2024].

Пузырчатка встречается на всех континентах кроме Антарктиды. Роль пузырчаток в жизни природы еще мало изучена. Считается, что они являются санитарами водоемов, так как очищают воду от болезнетворных организмов и обогащают ее кислородом [Пузырчатка обыкновенная... 2025]. В связи с этим пузырчатка (*U. vulgaris*) была выбрана в качестве тест объекта для фиторемедиационных исследований.

Бутилгликоль исследуется впервые при взаимодействии с высшими водными растениями. До этого времени опыты с бутилгликолем с данными тест объектами не проводились.

Концентрации загрязняющих веществ в микрокосмах были подобраны таким образом, чтобы они равнялись по 1000 и 2000 ПДК (предельно-допустимая концентрация). Использовали ПДК для воды водоемов рыбохозяйственного назначения.

ПДК бутилгликоля в водах водных объектов рыбохозяйственного значения составляет 0.01 мг/л. Класс опасности бутилгликоля-3 [Приказ Минсельхоза России № 552, 2016].

Для опыта минимальная концентрация составила 10 мг/л и максимальная 20 мг/л.

Опыты проводили в пресноводных микрокосмах. Было задействовано 12 микрокосмов + 3 контрольных микрокосма без добавления ксенобиотика. Еще 4 сосуда без добавления макрофитов, но с добавлением бутилгликоля. Два с 1000 ПДК и два с 2000 ПДК. Итого: 19 экспериментальных систем (табл. 1).

В микрокосмы добавляли бутилгликоль по 1000 ПДК, данная концентрация равнялась 10 мг/л. Добавка бутилгликоля в микрокосмы по 2000 ПДК составила 20 мг/л (табл. 1).

Во всех микрокосмах было по 1000 мл ОВВ (отстоянной водопроводной воды).

В качестве контроля взяли по одному пресноводному микрокосму на каждый вид растения: 5А-Роголистник (9.3 грамма сырого веса побегов); 5В-Элодея (2.3 грамма сырого веса побегов); 5С-Пузырчатка (4.6 грамма сырого веса побегов).

После создания микрокосмов их инкубировали в условиях естественной фотопериодичности (растения находились 12 часов в сутки при дневном свете) при температуре воды 13-27°С в течение 10 суток. Кислотность (pH воды) практически не изменилась при добавлении бутилгликоля. Этот показатель составлял 7,1 (в опыте) и 7,2 (в контроле – без добавления вещества).

Измерения бутилгликоля в воде микрокосмов проводили на хроматомасс-спектрометре Pegasus 4D фирмы LECO. Практически все методы анализа хроматомасс-спектрометрии заключаются в детектировании и измерении сигнала конкретного соединения или интегрального параметра. Рекорды чувствительности – 10^{-18} г, 10^{-21} М, то есть речь идет о нескольких сотнях молекул анализируемого соединения в пробе. Масс – спектрометрия предоставляет полную информацию, на базе которой можно принимать природоохранные решения [Поклонов 2013].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные опыты показали, что высшие водные растения снижали концентрации бутилгликоля (табл. 2).

Таблица 2. Концентрация бутилгликоля в микрокосмах спустя 5 суток инкубации

Номера микрокосмов, названия макрофитов	Добавка бутилгликоля 1000 ПДК (10 мг/л), остаток вещества в микрокосмах	Добавка бутилгликоля 2000 ПДК (20 мг/л), остаток вещества в микрокосмах
1A (*C. demersum*)	5.23	–
1B (*C. demersum*)	5.81	–
1C (*C. demersum*)	–	6.81
1D (*C. demersum*)	–	6.42
2A (*E.canadensis*)	6.75	–
2B (*E.canadensis*)	6.93	–
2C (*E.canadensis*)	–	9.66
2D (*E.canadensis*)	–	10.42
3A (*U. vulgaris*)	8.51	–
3B (*U. vulgaris*)	8.91	–
3C (*U. vulgaris*)	–	14.91
3D (*U. vulgaris*)	–	15.94
4A (без макрофитов)	8.87	–
4B (без макрофитов)	8.95	–
4C (без макрофитов)	–	17.29
4D (без макрофитов)	–	18.67

После пяти суток инкубации появились признаки неблагополучия состояния макрофитов у *E.canadensis* в обеих концентрациях. Пузырчатка (*U. vulgaris*) не имела признаков фитотоксичности спустя 5 суток инкубации (табл. 2). Роголистник не имел признаков неблагополучия только в концентрации 10 мг/л.

Концентрации бутилгликоля снизились в присутствии макрофитов после 5 суток инкубации (рис. 1).

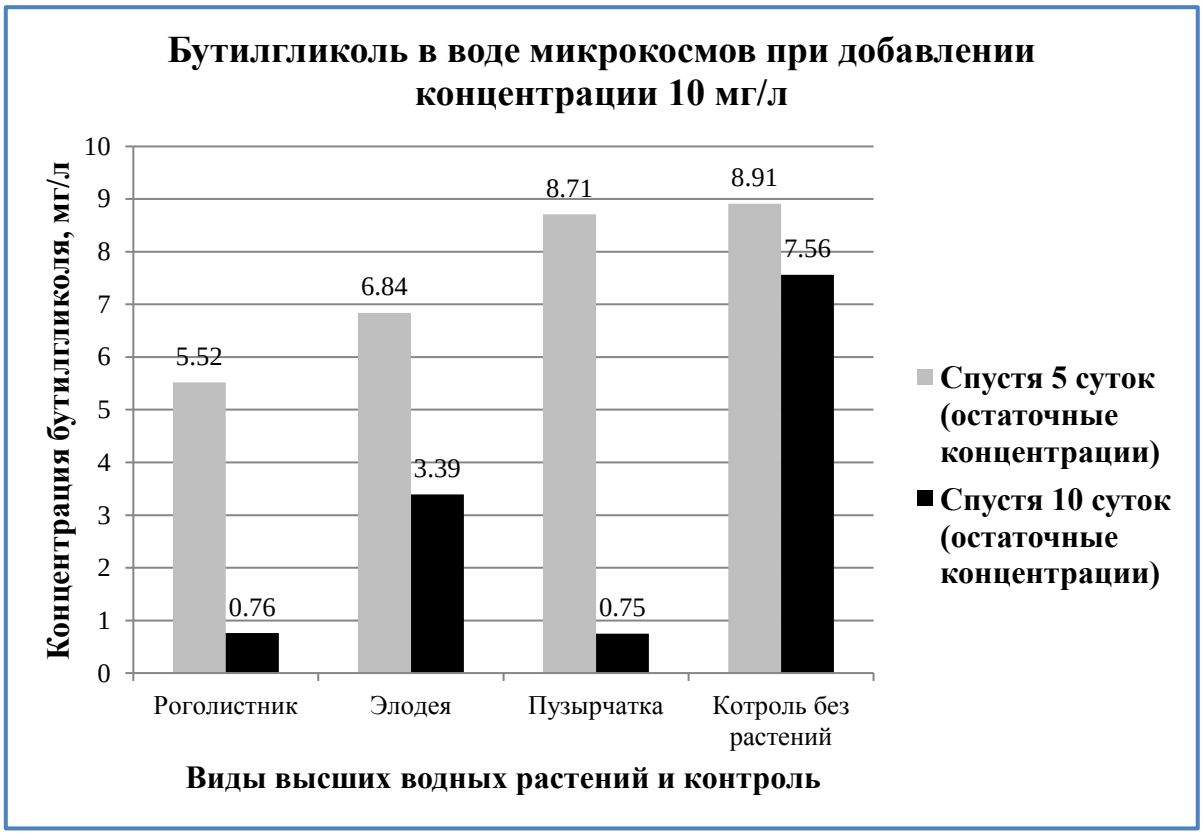


Рисунок 1. Остаточные концентрации бутилгликоля (добавленные концентрации 10 мг/л)

Концентрации бутилгликоля снизились в присутствии макрофитов после 5 суток инкубации (рис. 1).

Состояние микрокосмов спустя 5 суток инкубации

Роголистник темно-зеленый (*Ceratophyllum demersum*)

1A и 1B (добавка 10 мг/л): Растения занимают весь столб воды, без именений от контроля.

1C (добавка 20 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 5% бурых побегов, появляются нитчатые водоросли.

1D (добавка 20 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 10% бурых побегов, появляются нитчатые водоросли.

Элодея канадская (*Elodea canadensis*)

2A (добавка 10 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 20% бледных побегов.

2B (добавка 10 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 30% бледных побегов.

2C (добавка 20 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 70% бледных побегов.

2D (добавка 20 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 65% бледных побегов.

Пузырчатка обыкновенная (*Utricularia vulgaris*)

3A и 3B (добавка 10 мг/л): Растения занимают весь столб воды, без изменений от контроля.

3C и 3D (добавка 20 мг/л): Растения занимают весь столб воды, без изменений от контроля.

Во всех микрокосмах с добавлением бутилгликоля ощущался резкий химический запах.

Концентрации бутилгликоля существенно снизились в присутствии макрофитов после 10 суток инкубации. Особенно заметно снижение концентраций бутилгликоля в микрокосмах с *C. demersum* и *U. vulgaris* (рис. 2).

Состояние микрокосмов спустя 10 суток инкубации

Роголистник темно-зеленый (*Ceratophyllum demersum*)

1A и 1B (добавка 10 мг/л): Растения занимают весь столб воды, побеги жизнеспособны, нет отмерших побегов, появление нитчатых водорослей.

1C (добавка 20 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 30% отмерших (бурого цвета) побегов, много нитчатых водорослей.

1D (добавка 20 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 50% отмерших (бурого цвета) побегов, много нитчатых водорослей.

Элодея канадская (*Elodea canadensis*)

2A (добавка 10 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 35% бледных, отмерших побегов, много нитчатых водорослей.

2B (добавка 10 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 50% бледных, отмерших побегов, много нитчатых водорослей.

2C (добавка 20 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 95% бледных, отмерших побегов, много нитчатых водорослей.

2D (добавка 20 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 90% бледных, отмерших побегов, много нитчатых водорослей.

Пузырчатка обыкновенная (*Utricularia vulgaris*)

3A (добавка 10 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 10% бледных, отмерших побегов.

3B (добавка 10 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 5% бледных, отмерших побегов.

3C (добавка 20 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 30% бледных, отмерших побегов.

3D (добавка 20 мг/л): Растения занимают весь столб воды, 25% бледных, отмерших побегов.

Во всех микрокосмах (с *Elodea canadensis*) с добавлением бутилгликоля ощущался химический запах спустя десять дней. В микрокосмах с Пузырчаткой (*Utricularia vulgaris*) и Роголистником (*Ceratophyllum demersum*) химический запах исчез после 10 дней инкубации. Во всех микрокосмах без макрофитов (с добавлением бутилгликоля) запах, ксенобиотика сохранялся.

Концентрации бутилгликоля существенно снизились в присутствии макрофитов после 10 суток инкубации. Особенно заметно снижение концентраций бутилгликоля в микрокосмах с *C. demersum* и *U. vulgaris* (рис. 2).

Рисунок 2. Остаточные концентрации бутилгликоля (добавленные концентрации 20 мг/л)

Особенно заметно снижение концентраций бутилгликоля в микрокосмах с *C. demersum* и *U. vulgaris* после 10 суток инкубации (рис. 2).

На 10 сутки была выявлена практически полная гибель макрофитов (*E. canadensis*) от воздействия бутилгликоля.

Концентрации бутилгликоля в водной среде после пяти суток инкубации приведены в таблице 2, после десяти суток инкубации приведены в таблице 3.

Таблица 3. Концентрация бутилгликоля в микрокосмах спустя 10 суток инкубации

Номера микрокосмов, названия макрофитов	Добавка бутилгликоля 1000 ПДК (10 мг/л), остаток вещества в микрокосмах	Добавка бутилгликоля 2000 ПДК (20 мг/л), остаток вещества в микрокосмах
1A (*C. demersum*)	0.88	–
1B (*C. demersum*)	0.65	–
1C (*C. demersum*)	–	1.56
1D (*C. demersum*)	–	2.0
2A (*E.canadensis*)	3.07	–
2B (*E.canadensis*)	3.71	–
2C (*E.canadensis*)	–	4.49
2D (*E.canadensis*)	–	5.09
3A (*U. vulgaris*)	0.83	–
3B (*U. vulgaris*)	0.71	–
3C (*U. vulgaris*)	–	1.11
3D (*U. vulgaris*)	–	1.40
4A (без макрофитов)	7.31	–
4B (без макрофитов)	7.82	–
4C (без макрофитов)	–	15.98
4D (без макрофитов)	–	16.69

Измерения бутилгликоля в воде микрокосмов проводили методом хроматомасс-спектрометрии (табл. 4).

Таблица 4. Средние значения концентраций бутилгликоля (номинальные концентрации 10 мг/л и 20 мг/л, созданные в начале опыта) в водной среде микрокосмов с макрофитами трех видов после десяти суток инкубации

№ микрокосма	Виды макрофитов в микрокосмах	Концентрации бутилгликоля, % от контроля	Концентрации бутилгликоля, мг/л
Опыт с бутилгликолем 10 мг/л			
1A,1B	*C. demersum*	10	0.76
2A,2B	*E. canadensis*	44.8	3.39
3A,3B	*U. vulgaris*	10.2	0.77
4A,4B	Контроль без растений	100	7.56
Опыт с бутилгликолем 20 мг/л			
1C,1D	*C. demersum*	10.9	1.78
2C,2D	*E. canadensis*	29.3	4.79
3C,3D	*U. vulgaris*	7.6	1.25
4A,4D	Контроль без растений	100	16.33

Чтобы получить скорость вывода бутилгликоля за десять суток (табл. 5), необходимы определенные расчеты (на примере *C. demersum*-опыт с бутилгликолем 10 мг/л):

1. Находим разность исходной концентрации бутилгликоля от оставшейся после пяти суток.
   10 мг - 0.76 мг = 9.24 мг
2. Делим полученное число на 10 дней инкубации.
   9.24 мг ÷ 10 = 0.92 мг
3. Получаем сумму в миллиграммах (0.92).
4. Переводим миллиграммы в граммы (0.92 мг = 0.00092 г).

5. Находим молярную массу бутилгликоля. Бутилгликоль (C4H10O2) имеет молярную массу 104.15 г/моль.
6. Находим количество молей (0.00092 г / 104.15 г/моль = 0.00000883 моль/л).
7. Определяем молярную концентрацию (0.00000883 моль/л = 8.83 × 10-6).

Расчеты, описанные выше, были использованы для всех концентраций и всех растений.

Таблица 5. Скорость вывода бутилгликоля из растворов за 10 суток инкубации

№ микрокосма	Виды макрофитов в микрокосмах	Скорость вывода бутилгликоля из растворов за десять суток инкубации (моль/л в сутки)
Опыт с бутилгликолем 10 мг/л		
1A,1B	*C. demersum*	8.83×10^{-6}
2A,2B	*E. canadensis*	6.33×10^{-6}
3A,3B	*U. vulgaris*	8.86×10^{-6}
4A,4B	Контроль без растений	2.30×10^{-6}
Опыт с бутилгликолем 20 мг/л		
1C,1D	*C. demersum*	1.74×10^{-5}
2C,2D	*E.canadensis*	1.45×10^{-5}
3C,3D	*U. vulgaris*	1.79×10^{-5}
4A,4D	Контроль без растений	3.45×10^{-6}

ОБСУЖДЕНИЕ

Бутилгликоль интенсивно стимулировал рост нитчатых водорослей в микрокосмах с *C. demersum* и *E. canadensis*. В контрольных микрокосмах без добавления бутилгликоля не наблюдался рост нитчатых водорослей. По-видимому, рост нитчатых водорослей связан со снижением иммунитета водных растений, т.е. происходила гибель клеток тканей макрофитов и появлялись доступные для водорослей биогенные вещества.

Из таблицы 4 видно, что наличие биомассы водных растений во всех микрокосмах ускоряло снижение концентраций бутилгликоля в воде по сравнению с контрольными микрокосмами без растений. Это означает, что в присутствии макрофитов концентрации бутилгликоля снижались значительно быстрее (микрокосмы с Роголистником и Пузырчаткой), чем в контроле. Интересно, что бутилгликоль деструктурировался в микрокосмах с макрофитом *U. vulgaris* в большем объеме с 5 до 10 суток инкубации, то есть во второй половине опыта (табл. 2; табл. 3). Данная информация может оказаться полезной при разработке фитотехнологий по очищению окружающей среды.

С тем фактом, что в присутствии высших водных растений быстро снижалась концентрация бутилгликоля в воде, в целом согласовались факты работы изучения концентрации гликолей – похожие по химическому строению на бутилгликоль вещества – в биомассе растений. А именно, было установлено, что водное растение *Echinodorus cordifolius* L. Griseb. (Эхинодорус сердцелистный, семейство: Частухоцветные-*Alismatales* Dumort.) может поглощать различные гликоли. Гликоли накапливались в основном в листьях [Teamkao, Thiravetyan 2015]. Кроме того, доказано, что многие растения *Lemna gibba* L. (Ряска горбатая, семейство: Аронниковые-*Araceae* Juss.) [Allam *и др.* 2016], *Acorus calamus* L. (Аир обыкновенный, семейство: Аирные-*Acoraceae* Martinov), *Carex acutiformis* Ehrh. (Осока островидная, семейство: Осоковые-*Cyperáceae* Juss.), *Juncus effusus* L. (Ситник развесистый,

семейство: Ситниковые-*Juncaceae* Juss.) также могут удалять из воды различные виды гликолей [Lyu *и др.* 2023].

Была оценена скорость биодеструкции бутилгликоля (табл. 5). Расчеты проводились после десяти суток инкубации.

Скорость вывода бутилгликоля была выше в концентрации 20 мг/л. Интерпретируя полученные данные, можно предположить, что чем выше концентрация бутилгликоля в воде, тем быстрее он удаляется из микрокосма за счет физического испарения и биодеструкции растениями (табл. 5).

Наблюдения показали, что бутилгликоль выводился быстрее, взаимодействуя с растениями. Это свидетельствует о том, что бутилгликоль не является стойким веществом и может легко деструктироваться в пресноводных водоемах. Процесс вывода ксенобиотика происходил во всех микрокосмах с макрофитами быстрее, чем в контрольных микрокосмах без растений (табл. 5).

Для целей фиторемедиации большое значение имеет не только воздействие растений на загрязняющие вещества, но и воздействие растворенного вещества (бутилгликоля) на растения. Во втором случае может проявляться фитотоксичность ксенобиотика. Эта возможность должна исследоваться, так как является решением при разработке экологических технологий очищения водной среды.

Прогрессу разработки теории самоочищения воды в водных экосистемах уделяется значительное внимание [Остроумов 2008]. Результаты данной работы вносят вклад в развитие теории самоочищения воды с участием многих гидробионтов, включая водные растения.

ВЫВОДЫ

На основании данной работы сделаны следующие выводы:

Впервые выявлена способность трех видов высших водных растений (*Ceratophyllum demersum, Elodea canadensis, Utricularia vulgaris*) способствовать снижению концентраций бутилгликоля в водной среде (табл. 4).

Показано, что бутилгликоль вызывал гибель *Elodea Canadensis* через десять суток в концентрации 20 мг/л. Наблюдались серьезные признаки фитотоксичности и в концентрации 10 мг/л для Элодеи. Другие виды (*Ceratophyllum demersum, Utricularia vulgaris*) оказались более устойчивыми к воздействию бутилгликоля, но и у них имелись определенные признаки неблагополучия.

В присутствии *C. demersum* и *U. vulgaris* снижение концентраций бутилгликоля составило больше 85% процентов (по сравнению с контролем без растений) при добавлении концентрации 10 мг/л и 20 мг/л спустя 10 суток.

Новые данные опытов расширяют набор знаний о фиторемедиационном потенциале высших водных растений и вносят вклад в разработку фитотехнологий очищения воды, а также в выявление диапазона условий, в рамках которых можно использовать данные виды в целях фиторемедиации.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Эта работа была поддержана текущим институциональным финансированием. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов (Conflicts of Interest)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов с кем-либо. Автор дополнительно официально информирует читателей, что настоящая статья не содержит исследований с участием людей или животных в качестве объектов исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Игнатенко А.В. (**2022**) Анализ биологической очистки сточных вод и детоксикации активного ила очистных сооружений. *Химическая безопасность*. **6**(1): 21–46. https://doi.org/10.25514/CHS.2022.1.21002

Кашапова Н.Е., Башкирцева Н.Ю., Овчинникова Ю.С., Сладовская О.Ю., Мингазов Р.Р., Куряшов Д.А., Рахматуллин Р.Р. (**2015**) Воздействие гликолей в составе противообледенительных жидкостей на окружающую среду. *Вестник Казанского технологического университета*. **18**(5): 209–212. EDN: TOUBJL

Лубкова Т.Н., Пухов В.В., Шестакова Т.В., Тропин И.В., Котелевцев С.В., Остроумов С.А. (**2015**) Изучение взаимодействия токсичных металлов с биомассой одноклеточных водорослей методом ICP-MS. *Токсикологический вестник*. (6 (135)): 41–45. EDN: XQQZFB

Остроумов С.А. (**2008**) Гидробионты в самоочищении вод и биогенной миграции элементов. МАКС Пресс. Москва: 200. EDN: QKRPVF

Поклонов В.А. (**2013**) Мутагенные ксенобиотики, тяжёлые металлы и поверхностно - активные вещества в почвах и высших водных растениях. РУДН. Москва: 254. [Диссертация кандидата биологических наук] EDN: SUWISD

Поклонов В.А. (**2019**) Исследование взаимодействия алюминия с *Callitriche palustris* в условиях пресноводных экспериментальных систем. *Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени ЮА Овчинникова*. 15(1): 17. EDN: BBVLKJ

Приказ Минсельхоза России № 552. (**2016**) Нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Минсельхоз России. Москва: 91.

Пузырчатка обыкновенная: описание и размножение. (**2025**) [онлайн] Доступно на: https://kvetok.ru/rasteniya-dlya-akvariuma-i-vodoemov/puzyrchatka-obyknovennaya-2 (Просмотрено: 27.08.2025)

Пухов В.В., Лубкова Т.Н., Шестакова Т.В., Тропин И.В., Котелевцев С.В., Остроумов С.А. (**2015**) К разработке биотехнологии очищения воды с использованием ацидофильных водорослей: результаты анализа методом ICP-MS. *Экология промышленного производства*. (3): 28–32. EDN: UYCGRP

Самодолов А.П. (**2025**) Биоаккумуляция тяжелых металлов из AMD стоков. *Приволжский научный журнал*. (73 (1)): 153–159. EDN: LXHOQG

Тропин И.В., Остроумов С.А. (**2018**) Накопление свинца и других токсичных металлов водными растениями. *Токсикологический вестник*. (3 (150)): 38–41. EDN: XQJLED

Allam A., Tawfik A., Yoshimura C. (**2016**) Phytoremediation of Drainage Water Containing Mono Ethylene Glycol Using a Duckweed (*Lemna gibba*) Pond System. *Journal of Environmental Engineering*. **142**(5) https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001070

Ciurli A., Zuccarini P., Alpi A. (**2009**) Growth and nutrient absorption of two submerged aquatic macrophytes in mesocosms, for reinsertion in a eutrophicated shallow lake. *Wetlands Ecology and Management*. **17**(2): 107–115. https://doi.org/10.1007/s11273-008-9091-9

Diepens N.J., Arts G.H.P., Focks A., Koelmans A.A. (**2014**) Uptake, Translocation, and Elimination in Sediment-Rooted Macrophytes: A Model-Supported Analysis of Whole Sediment Test Data. *Environmental Science & Technology*. **48**(20): 12344–12353. https://doi.org/10.1021/es503121x

Dordio A., Carvalho A.J.P., Hijosa-Valsero M., Becares E. (**2018**) The Role of Macrophytes in the Removal of Organic Micropollutants by Constructed Wetlands. *In: Durán-Domínguez-de-Bazúa M.D.C., Navarro-Frómeta A.E., Bayona J.M. (ред.) Artificial or Constructed Wetlands.* CRC Press. Boca Raton, FL: 286–325. https://doi.org/10.1201/9781315184265-16

Hernández-Vásquez L.A., Romo-Gómez C., Alvarado-Lassman A., Prieto-García F., Camacho-López C., Acevedo-Sandoval O.A. (**2024**) Artificial Floating Islands for the Removal of Nutrients and Improvement of the Quality of Urban Wastewater. *Water*. **16**(10): 1443. https://doi.org/10.3390/w16101443

Khompun W., Theerakarunwong C.D., Chouychai W. (**2024**) Accumulation and Phytotoxicity of Cypermethrin and Deltamethrin to Aquatic Plants. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*. **47**(1): 77–89.

Li H., Lao Z., Liu Y. *и др.* (**2023**) Uptake, accumulation, and translocation of organophosphate esters and brominated flame retardants in water hyacinth (Eichhornia crassipes): A field study. *Science of The Total Environment*. **874**: 162435. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162435

Lyu T., Williams R., Exton B., Grabowski R.C. (**2023**) Assessing the efficacy and mechanisms of glycol-contaminated water treatment through floating treatment wetlands. *Water Science & Technology*. **88**(11): 2751–2761. https://doi.org/10.2166/wst.2023.389

Mustafa H.M., Hayder G. (**2021**) Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. *Ain Shams Engineering Journal*. **12**(1): 355–365. https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.009

Osti S.J.A., do Carmo C.F., Cerqueira S.M.A., Giamas D.M.T., Peixoto A.C., Vaz-dos-Santos A.M., Mercante C.T.J. (**2020**) Nitrogen and phosphorus removal from fish farming effluents using artificial floating islands colonized by Eichhornia crassipes. *Aquaculture Reports*. **17**: 100324. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100324

Poklonov V.A., Shestakova T. V., Ostroumov S.A. (**2018**) Phytotoxic Effect of Heavy Metal Mixture on Macrophytes. *Russian Journal of General Chemistry*. **88**(13): 2879–2883. https://doi.org/10.1134/S107036321813008X

Poklonov V.A., Glebov V. V., Askarova D.A., Erofeeva V. V., Anikina E. V. (**2021**) Study of the Toxicity of Synthetic Surfactant-Containing Composite Detergents on Plant Hydrobionts under Laboratory Conditions. *Russian Journal of General Chemistry*. **91**(13): 2908–2916. https://doi.org/10.1134/S1070363221130193

Poklonov V.A., Ostroumov S.A., Anikina E. V., Erofeeva V. V. (**2024**) Study of Interactions between Extreme Concentrations of Organic Solvents and Freshwater Plants: Toxicity and Tolerance. *Russian Journal of General Chemistry*. **94**(13): 3661–3671. https://doi.org/10.1134/S1070363224130309

Solomonova E.A., Ostroumov S.A. (**2007**) Tolerance of an aquatic macrophyte Potamogeton crispus L. to sodium dodecyl sulphate. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. **62**(4): 176–179. https://doi.org/10.3103/S0096392507040074

Sousa S.A., Esteves A.F., Salgado E.M., Pires J.C.M. (**2024**) Enhancing urban wastewater treatment: Chlorella vulgaris performance in tertiary treatment and the impact of anaerobic digestate

addition. *Environmental Technology & Innovation*. **34**: 103601. https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103601

Teamkao P., Thiravetyan P. (**2015**) Phytoremediation of Mono-, Di-, and Triethylene Glycol by *Echinodorus cordifolius* L. Griseb. *International Journal of Phytoremediation*. **17**(1): 93–100. https://doi.org/10.1080/15226514.2013.810579

Wang J., Zhu Y., Ye B., Dun J., Yu X., Sui Q. (**2024**) Absorption and translocation of selected pharmaceuticals in Pistia stratiotes: Spatial distribution analysis using matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Hazardous Materials*. 469: 134028. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134028

Zazouli M.A., Ala A., Asghari S., Babanezhad E. (**2024**) Evaluation of *Azolla filiculoides* potential in pyrene and phenanthrene accumulation and phytoremediation in contaminated waters. *International Journal of Phytoremediation*. **26**(5): 608–617. https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2257314

REFERENCES

Ignatenko A.V. (**2022**) Analysis of waste waters toxicity and detoxication during their biological treatment. *Chemical safety science*. **6**(1): 21–46. https://doi.org/10.25514/CHS.2022.1.21002 (In Rus.)

Kashapova N.E., Bashkirtseva N.Yu., Ovchinnikova Y.S., Sladovskaya O.Yu., Mingazov R.R., Kuryashov D.A., Rakhmatullin R.R. (**2015**) Impact of glycols in anti-icing fluids on the environment. *Herald of Technological University*. **18**(5): 209–212. EDN: TOUBJL (In Rus.)

Lubkova T.N., Pukhov V.V., Shestakova T.V., Tropin I.V., Kotelevtsev S.V., Ostroumov S.A. (**2015**) Study of interactions of toxic metals with biomass of unicellular algae using the method of ICP-MS method. *Toxicological review*. (6 (135)): 41–45. EDN: XQQZFB (In Rus.)

Ostroumov S.A. (**2008**) Aquatic organisms in water self-purification and biogenic migration of elements. MAKS Press. Moscow: 200. EDN: QKRPVF (In Rus.)

Poklonov V.A. (**2013**) Mutagenic xenobiotics, heavy metals and surfactants in soils and higher aquatic plants. RUDN. Moscow: 254. [Candidate thesis in Biological Sciences] EDN: SUWISD (In Rus.)

Poklonov V.A. (**2019**) Study of the interaction of aluminum with Callitriche palustris under freshwater experimental system conditions. Bulletin of Biotechnology and Physico-Chemical Biology named after Yu.A. Ovchinnikov. **15**(1): 17. EDN: BBVLKJ (In Rus.)

Order of the Ministry of Agriculture of Russia No. 552. (**2016**) Standards of maximum permissible concentrations of harmful substances in waters of water bodies of fishery value. Ministry of Agriculture of Russia. Moscow: 91. (In Rus.)

Utricularia vulgaris: description and propagation. (**2025**) [online] Available at: https://kvetok.ru/rasteniya-dlya-akvariuma-i-vodoemov/puzyrchatka-obyknovennaya-2 (Accessed: 27.08.2025) (In Rus.)

Pukhov V.V., Lubkova T.N., Shestakova T.V., Tropin I.V., Kotelevtsev S.V., Ostroumov S.A. (**2015**) Towards the development of a water purification biotechnology using acidophilic algae: results of analysis by the ICP-MS method. Ecology of Industrial Production. (3): 28–32. EDN: UYCGRP (In Rus.)

Samodolov A.P. (**2025**) Bioaccumulation of heavy metals from AMD effluents. Volga Scientific Journal. (73 (1)): 153–159. EDN: LXHOQG (In Rus.)

Tropin I.V., Ostroumov S.A. (**2018**) Accumulation of lead and other toxic metals by aquatic plants. Toxicological Bulletin. (3 (150)): 38–41. EDN: XQJLED (In Rus.)

Allam A., Tawfik A., Yoshimura C. (**2016**) Phytoremediation of Drainage Water Containing Mono Ethylene Glycol Using a Duckweed (*Lemna gibba*) Pond System. *Journal of Environmental Engineering*. **142**(5) https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001070

Ciurli A., Zuccarini P., Alpi A. (**2009**) Growth and nutrient absorption of two submerged aquatic macrophytes in mesocosms, for reinsertion in a eutrophicated shallow lake. *Wetlands Ecology and Management*. **17**(2): 107–115. https://doi.org/10.1007/s11273-008-9091-9

Diepens N.J., Arts G.H.P., Focks A., Koelmans A.A. (**2014**) Uptake, Translocation, and Elimination in Sediment-Rooted Macrophytes: A Model-Supported Analysis of Whole Sediment Test Data. *Environmental Science & Technology*. **48**(20): 12344–12353. https://doi.org/10.1021/es503121x

Dordio A., Carvalho A.J.P., Hijosa-Valsero M., Becares E. (**2018**) The Role of Macrophytes in the Removal of Organic Micropollutants by Constructed Wetlands. *In: Durán-Domínguez-de-Bazúa M.D.C., Navarro-Frómeta A.E., Bayona J.M. (ред.) Artificial or Constructed Wetlands.* CRC Press. Boca Raton, FL: 286–325. https://doi.org/10.1201/9781315184265-16

Hernández-Vásquez L.A., Romo-Gómez C., Alvarado-Lassman A., Prieto-García F., Camacho-López C., Acevedo-Sandoval O.A. (**2024**) Artificial Floating Islands for the Removal of Nutrients and Improvement of the Quality of Urban Wastewater. *Water*. **16**(10): 1443. https://doi.org/10.3390/w16101443

Khompun W., Theerakarunwong C.D., Chouychai W. (**2024**) Accumulation and Phytotoxicity of Cypermethrin and Deltamethrin to Aquatic Plants. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*. **47**(1): 77–89.

Li H., Lao Z., Liu Y. *и др.* (**2023**) Uptake, accumulation, and translocation of organophosphate esters and brominated flame retardants in water hyacinth (Eichhornia crassipes): A field study. *Science of The Total Environment*. **874**: 162435. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162435

Lyu T., Williams R., Exton B., Grabowski R.C. (**2023**) Assessing the efficacy and mechanisms of glycol-contaminated water treatment through floating treatment wetlands. *Water Science & Technology*. **88**(11): 2751–2761. https://doi.org/10.2166/wst.2023.389

Mustafa H.M., Hayder G. (**2021**) Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. *Ain Shams Engineering Journal*. **12**(1): 355–365. https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.009

Osti S.J.A., do Carmo C.F., Cerqueira S.M.A., Giamas D.M.T., Peixoto A.C., Vaz-dos-Santos A.M., Mercante C.T.J. (**2020**) Nitrogen and phosphorus removal from fish farming effluents using artificial floating islands colonized by Eichhornia crassipes. *Aquaculture Reports*. **17**: 100324. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100324

Poklonov V.A., Shestakova T. V., Ostroumov S.A. (**2018**) Phytotoxic Effect of Heavy Metal Mixture on Macrophytes. *Russian Journal of General Chemistry*. **88**(13): 2879–2883. https://doi.org/10.1134/S107036321813008X

Poklonov V.A., Glebov V. V., Askarova D.A., Erofeeva V. V., Anikina E. V. (**2021**) Study of the Toxicity of Synthetic Surfactant-Containing Composite Detergents on Plant Hydrobionts under Laboratory Conditions. *Russian Journal of General Chemistry*. **91**(13): 2908–2916. https://doi.org/10.1134/S1070363221130193

Poklonov V.A., Ostroumov S.A., Anikina E. V., Erofeeva V. V. (**2024**) Study of Interactions between Extreme Concentrations of Organic Solvents and Freshwater Plants: Toxicity and Tolerance. *Russian Journal of General Chemistry*. **94**(13): 3661–3671. https://doi.org/10.1134/S1070363224130309

Solomonova E.A., Ostroumov S.A. (**2007**) Tolerance of an aquatic macrophyte Potamogeton crispus L. to sodium dodecyl sulphate. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. **62**(4): 176–179. https://doi.org/10.3103/S0096392507040074

Sousa S.A., Esteves A.F., Salgado E.M., Pires J.C.M. (**2024**) Enhancing urban wastewater treatment: Chlorella vulgaris performance in tertiary treatment and the impact of anaerobic digestate addition. *Environmental Technology & Innovation*. **34**: 103601. https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103601

Teamkao P., Thiravetyan P. (**2015**) Phytoremediation of Mono-, Di-, and Triethylene Glycol by *Echinodorus cordifolius* L. Griseb. *International Journal of Phytoremediation*. **17**(1): 93–100. https://doi.org/10.1080/15226514.2013.810579

Wang J., Zhu Y., Ye B., Dun J., Yu X., Sui Q. (**2024**) Absorption and translocation of selected pharmaceuticals in Pistia stratiotes: Spatial distribution analysis using matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Hazardous Materials*. 469: 134028. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134028

Zazouli M.A., Ala A., Asghari S., Babanezhad E. (**2024**) Evaluation of *Azolla filiculoides* potential in pyrene and phenanthrene accumulation and phytoremediation in contaminated waters. *International Journal of Phytoremediation*. **26**(5): 608–617. https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2257314

Цитировать как

Поклонов В.А. (**2025**). Ускорение снижения концентраций бутилгликоля в пресной воде в присутствии макрофитов. *Экобиотех*. **8** (4): 530-544. DOI: 10.31163/2618-964X/2025-39 EDN: SKUDUI

Cited as

Poklonov V.A. (**2025**). Acceleration in the decrease in the concentrations of butyl glycol in freshwater in the presence of aquatic macrophytes. *Ecobiotech*. **8** (4): 530-544. DOI: 10.31163/2618-964X/2025-39 EDN: SKUDUI (In Rus.)

Сведения об авторах

Владислав Александрович Поклонов, к.б.н., заведующий лабораторией экологического мониторинга водных объектов МНЭПУ, Международный независимый эколого-политологический университет, Москва, Российская Федерация. E-mail: mr.poklonov@internet.ru, SPIN-код: 6635-8026; https://orcid.org/0000-0003-2722-7283.

Information About the Author(s)

Vladislav A. Poklonov, PhD in Biological Sciences, Head of the Laboratory of Environmental Monitoring of Water Bodies of the IIUEPS/MNEPU, International Independent University of Environmental & Political Sciences, Moscow, Russian Federation. E-mail: mr.poklonov@internet.ru, SPIN-код: 6635-8026; https://orcid.org/0000-0003-2722-7283.