



Трухина Г.М., Борисова Н.А., Синицына О.О.

Влияние нефтепродуктов на микробиом водной среды. Контроль безопасности

ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Загрязнение воды нефтепродуктами представляет серьёзную опасность для здоровья человека. При попадании нефти и продуктов её переработки в водоёмы нарушается естественная экосистема, вода становится непригодной для питья и использования в быту. Актуальность обеспечения биологической безопасности обусловлена постоянным негативным влиянием загрязнения водных объектов различными химическими веществами на формирование микробиома среды и здоровье населения.

Цель исследования — изучение жизнеспособности микробиома водной среды в условиях повышенной нагрузки нефтепродуктов на водные объекты.

Материалы и методы. Состояние микробных сообществ в воде водных объектов изучали в экспериментальных условиях с добавлением в речную воду нефтепродуктов: бензина неэтилированного марки АИ-95 и мазута марки М-100. В 28 экспериментальных модельных водоёмов добавляли бензин на уровне ПДК (0,1 мг/дм³), 10 ПДК, 100 ПДК, 1000 ПДК и суспензию потенциально патогенных тест-микроорганизмов *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa* и патогенных микроорганизмов *Salmonella typhimurium*. В 16 модельных водоёмов вносили мазут, создавая плёнку толщиной 1 см или взвесь капель в толще воды, и суспензии *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* и патогенных микроорганизмов *Salmonella enterica* (подвид *enterica*, серотип *enteritidis*). Инфицирующая доза микроорганизмов для модельных водоёмов составляла 10² КОЕ/дм³, 10³ КОЕ/дм³, 10⁴ КОЕ/дм³. Эксперимент по изучению воздействия бензина на санитарно-показательные и патогенные микроорганизмы продолжался 14 сут, мазута — 30 сут.

Результаты. Концентрации нефтепродуктов до 10 ПДК приводили к ингибированию роста общего микробного числа и санитарно-показательных микроорганизмов *E. coli* и *E. faecalis*, сохраняя ассоциативную связь с патогенными микроорганизмами до 12 сут экспозиции при попадании бензина в воду водоёма и до 20–31 сут при капельном разливе мазута. Концентрации бензина 100 ПДК и 1000 ПДК и при разливе мазута в воде виде плёнки приводили к стопроцентной гибели *E. coli* и *E. faecalis* после 6 сут экспозиции. Повышенные концентрации нефтепродуктов в воде водоёмов обеспечивали достоверное увеличение углеводородокисляющих бактерий *Pseudomonas aeruginosa* при удлинении времени контакта.

Ограничения исследования. Полученные экспериментальные данные будут подтверждены натурными исследованиями воды водоёмов.

Заключение. При попадании значительной концентрации нефтепродуктов в водный объект при аварийных ситуациях, сбросе недостаточно очищенных сточных вод нефтеперерабатывающих предприятий контроль безопасности воды водоёмов целесообразно проводить, ориентируясь на санитарно-показательные микроорганизмы *E. coli* и *E. faecalis*. При длительном поступлении в воду водоёмов высоких концентраций нефтепродуктов мониторинг безопасности воды следует вести по формированию углеводородокисляющих бактерий, в том числе *Pseudomonas aeruginosa*.

Ключевые слова: микробиоценоз; водные объекты; нефтепродукты; безопасность водопользования; нефтедеструкторы; санитарно-показательные микроорганизмы

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике.

Для цитирования: Трухина Г.М., Борисова Н.А., Синицына О.О. Влияние нефтепродуктов на микробиом водной среды. Контроль безопасности. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(12): 1649–1655. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-12-1649-1655> <https://elibrary.ru/uhuuqr>

Для корреспонденции: Трухина Галина Михайловна, e-mail: trukhina@list.ru

Участие авторов: Трухина Г.М. — концепция и дизайн исследования, анализ полученных данных, написание текста, редактирование; Борисова Н.А. — концепция и дизайн исследования, сбор и анализ данных, написание текста; Синицына О.О. — написание текста, редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках реализации государственной программы «Обеспечение химической и биологической безопасности Российской Федерации на 2021–2024 гг.».

Поступила: 21.11.2025 / Поступила после доработки: 15.12.2025 / Принята к печати: 19.12.2025 / Опубликовано: 15.01.2026

Galina M. Trukhina, Natalya A. Borisova, Oxana O. Sinitsyna

The impact of petroleum products on the aquatic microbiome. Monitoring for safety

Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Water pollution with oil products poses a serious threat to human health. When oil and its derivatives enter water bodies, the natural ecosystem is disrupted, rendering the water unsuitable for drinking and household use. Ensuring biological safety is essential due to the ongoing adverse impact of pollution of aquatic components by various chemical factors on the formation of the environment's microbiome and public health.

The aim of this study was to investigate the viability of the aquatic microbiome under conditions of increased oil product loads on water bodies.

Materials and methods. The state of microbial communities in the water of water bodies was studied under experimental conditions with the addition of petroleum products to river water: unleaded AI-95 gasoline and M-100 fuel oil. Gasoline was added to twenty eight experimental model reservoirs — at the level of MPC (0.1 mg/dm³), 10 MPC, 100 MPC, 1000 MPC and a suspension of potentially pathogenic test microorganisms *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa* and pathogenic microorganisms *Salmonella typhimurium*. Fuel oil was applied to 16 model ponds, creating a 1 cm thick film or suspension of droplets in the water column and suspension of *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, and pathogenic microorganisms *Salmonella enterica* subspecies *enterica* serotype *enteritidis*. The infectious microorganisms for model reservoirs was 10² CFU/dm³, 10³ CFU/dm³, 10⁴ CFU/dm³. The experiment to study the effect of gasoline on sanitary-indicative and pathogenic microorganisms lasted 14 days, fuel oil — 30 days.

Results. Concentrations of petroleum products up to 10 MPC inhibited the growth of total microbial counts and the sanitary indicator microorganisms *E. coli* and *E. faecalis*. Maintaining an associative link with pathogenic microorganisms for up to 12 days of exposure when gasoline spilled into water bodies and up to

20–31 day when fuel oil spilled droplets. Gasoline concentrations of 100× and 1000× MPC, as well as a fuel oil spill in water as a film, resulted in 100% mortality of *E. coli* and *E. faecalis* after 6 days of exposure. Elevated concentrations of petroleum products in water bodies resulted in a significant increase in the hydrocarbon-oxidizing bacteria *Pseudomonas aeruginosa* with prolonged contact time.

Limitations. The obtained experimental data will be confirmed by in-kind studies of water in reservoirs.

Conclusion. When significant concentrations of petroleum products enter a water body during emergency situations or the discharge of insufficiently treated wastewater from oil refineries, it is advisable to monitor the safety of water bodies using the sanitary indicator microorganisms *E. coli* and *E. faecalis*. In case of long-term release of high concentrations of petroleum products into water bodies, water safety monitoring should be carried out for the formation of hydrocarbon-oxidizing bacteria, including *Pseudomonas aeruginosa*.

Keywords: microbiocenosis; water bodies; petroleum products; water safety; oil degraders; sanitary indicator microorganisms

Compliance with ethical standards. This study does not require the conclusion of a biomedical ethics committee or other documents.

For citation: Trukhina G.M., Borisova N.A., Sinitsyna O.O. The impact of petroleum products on the aquatic microbiome. Monitoring for safety. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(12): 1649–1655. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-12-1649-1655> <https://elibrary.ru/uhuyrp> (In Russ.)

For correspondence: Galina M. Trukhina, e-mail: trukhina@list.ru

Contribution: Trukhina G.M. — concept and design of the study, analysis of obtained data, writing text, editing; Borisova N.A. — concept and design of the study, data collection and analysis, writing text; Sinitsyna O.O. — writing text, editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study was conducted as part of the state program “Ensuring Chemical and Biological Safety of the Russian Federation for 2021–2024.”

Received: November 21, 2025 / Revised: December 15, 2025 / Accepted: December 19, 2025 / Published: January 15, 2026

Введение

Возрастающая химизация производства и быта приводит к загрязнению окружающей среды химическими веществами органической природы. По данным ежегодной статистической отчетности Роспотребнадзора, более трети поверхностных водных объектов России (40%) имеют химическое и микробное загрязнение, превышающее во много раз гигиенические нормативы, что полностью исключает возможность их использования для любых целей. Негативное воздействие органических веществ, таких как нефть и нефтепродукты, на среду обитания отдельных территорий Российской Федерации неблагоприятно отражается на формировании микробиоценозов среды и микробиоты человека, действие которых недостаточно изучено [1]. Разливы нефти и нефтепродуктов представляют собой одну из наиболее острых экологических проблем, оказывая разрушительное воздействие на окружающую среду и здоровье человека [2]. При попадании нефти в воду или почву происходит выделение токсичных веществ, обладающих канцерогенными и мутагенными свойствами, что может привести к серьёзным нарушениям в организме человека при длительном воздействии [3]. При попадании нефти и продуктов её переработки в водоёмы они распространяются по поверхности, нарушая естественную экосистему и делая воду непригодной для питья и использования в быту [4]. Так, только Атлантический океан получает ежегодно 190 000–760 000 т отходов нефтепродуктов, а Средиземное море — до 2,1 млн тонн, при этом морская рыба как основное звено пищевой цепи в морях умеренных широт нередко поглощает мелкие частицы нефти. Передвигаясь по пищевой цепи, нефтепродукты могут дойти до человека. В связи с этим возникает необходимость раннего определения влияния нефтепродуктов на специфические группы бактерий, которые используют это вещество в качестве энергетического и конструктивного субстрата [5–7].

Проблема выявления основных закономерностей и механизмов взаимодействия нефти и нефтепродуктов на компоненты микробиоценоза пресноводной системы и почвы с выявлением токсических эффектов и оценкой зависимости «доза — эффект» изучена недостаточно [8–11]. Состояние водных объектов подтверждает необходимость разработки унифицированной системы оценки природно-рекреационного потенциала водных объектов, учитывающей региональную специфику состояния поверхностных вод.

В последние годы водный фактор вносит значительный вклад в заболеваемость острыми кишечными инфекциями (ОКИ) в связи с тем, что современная окружающая среда испытывает мощное влияние факторов антропогенного

характера, к числу которых можно отнести загрязнение химической природы, которые определённым образом влияют на микробные сообщества водных объектов. При их воздействии в клетках микроорганизмов происходят деграционные изменения, способные привести к ингибированию или размножению популяции бактерий. Влияние поллютантов как стрессовых факторов является причиной фенотипических и генетических изменений, приводящих к увеличению потенциала патогенности бактерий и риску распространения кишечных инфекций среди населения. При этом исследования, посвящённые влиянию органических и неорганических веществ на клетки санитарно-показательных микроорганизмов, в литературе практически не освещены.

Суммарная заболеваемость ОКИ в многолетней динамике характеризуется тенденцией к снижению, но в 2024 г. заболеваемость (456,56 на 100 тыс. населения) превысила уровень 2023 г. (441,5 на 100 тыс. населения) и была на 14% ниже среднелетнего показателя (СМП) (527,88 на 100 тыс. населения). Заболеваемость норовирусной инфекцией в 2024 г. превысила уровень 2023 г. на 9% и среднелетний уровень в 1,8 раза. Преимущественно регистрируются ОКИ бактериальной природы, удельный вес случаев норовирусной инфекции среди ОКИ составил 42,2%. В 2024 г. на фоне общей тенденции к снижению суммарной заболеваемости ОКИ в многолетней динамике продолжался значительный рост числа очагов инфекций с фекально-оральным механизмом передачи и числа пострадавших в них в сравнении с СМП. По итогам 2024 г. зарегистрировано увеличение количества таких очагов, что на 30,4% превышает СМП (548,4 очага) и на 16,6% уровень 2023 г. (613 очагов). Вызывает тревогу нарастание удельного веса ОКИ неустановленной этиологии, который в 2024 г. составил 62,4%, что свидетельствует о недостаточном внедрении в практическую деятельность современных методов диагностики болезней. В группу риска входят дети в возрасте от 1 года до 6 лет. Удельный вес детского населения среди пострадавших в очагах ОКИ составляет 71,7%, число пострадавших детей в 2024 г. увеличилось на 31% в сравнении со СМП (6382,6 человек) и на 24,5% относительно уровня 2023 г. По величине экономического ущерба ОКИ в структуре инфекционных болезней занимают 4-е место: более 20 млн рублей в 2024 г. [1]. С введением СанПиН 2.1.3685–21¹ расширен перечень

¹ СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», утверждённые постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 г. № 2 (зарегистрированы Минюстом России 29.01.2021 г., регистрационный № 62296), с изменениями.

Соотношение общего числа микроорганизмов (ОМЧ), выросших при температуре плюс 37 °С (ОМЧ 37 °С) и плюс 22 °С (ОМЧ 22 °С), в модельных водоёмах в течение 12 сут воздействия бензина в концентрациях на уровне ПДК, 10 ПДК, 100 ПДК и 1000 ПДК

The ratio of the total number of microorganisms (TNM) grown at a temperature of 37 °C (TNM 37 °C) and 22 °C (TNM 37 °C) in model reservoir during 12 days of exposure to gasoline in a concentration at the level of MPC, 10 MPC, 100 MPC and 1000 MPC

Время контакта, сут Contact time, day	ОМЧ 37 °С / ОМЧ 22 °С TNM 37 °С / TNM 22 °С			
	ПДК MPC	10 ПДК MPC	100 ПДК MPC	1000 ПДК MPC
0-е	1 : 4	1 : 4	1 : 3	1 : 3
1-е 1 st	1 : 3	1 : 2	1 : 2	1 : 1
2-е 2 nd	1 : 2	1 : 0.9	1 : 0.4	1 : 0.2
6-е 6 th	1 : 8	1 : 5	1 : 1.4	1 : 1.1
14-е 14 th	1 : 18	1 : 7	1 : 2	1 : 1

санитарно-показательных микроорганизмов и оптимизированы критериальные показатели оценки безопасности водных объектов. Количественный учёт выявляет степень эпидемической опасности различных видов вод и риск развития болезней. Изучение поведения индикаторных микроорганизмов в водной среде с повышенным содержанием органических и неорганических веществ является необходимым условием адекватной оценки риска возникновения и распространения инфекций.

Цель исследования — изучение жизнеспособности микробиома водной среды в условиях повышенной нагрузки нефтепродуктов на водные объекты.

Материалы и методы

Состояние микробных сообществ в воде водных объектов изучали в экспериментальных условиях с добавлением таких нефтепродуктов, как бензин неэтилированный марки АИ-95 (прозрачная лёгкая фракция) и мазут топочный марки М-100 (вязкая жидкость чёрного цвета). Для изучения зависимости изменения санитарно-показательных и патогенных микроорганизмов от концентрации нефтепродукта в водной среде использовали метод моделирования. Для этих целей создавали 28 модельных водоёмов с добавлением бензина АИ-95 в концентрациях на уровне ПДК (0,1 мг/дм³), 10 ПДК, 100 ПДК, 1000 ПДК и искусственным внесением суспензии тест-микроорганизмов *Escherichia coli* 1257, *Enterococcus faecalis* ATCC 29212, *Salmonella typhimurium* 5715 и *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853 в инфицирующей дозе 10² КОЕ/дм³, 10³ КОЕ/дм³, 10⁴ КОЕ/дм³.

Влияние мазута на микрофлору изучали на 16 модельных водоёмах, предварительно заражённых дикими штаммами микроорганизмов, выделенными из морской воды (*Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*), а также тест-штаммами *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *S. enterica* (подвид *enterica*, серотип *enteritidis* ATCC 13076) в концентрациях 10³ КОЕ/дм³ в двух вариантах внесения нефтепродукта после его разогревания до температуры плюс 60 °С на водяной бане. В половину водоёмов мазут насливали так, чтобы образовалась плёнка толщиной 1 см, покрывающая всю поверхность водоёма. Во вторую половину водоёмов мазут вносили каплями, создавая водомазутную эмульсию в виде гранул мазута в воде. В качестве воды для модельных водоёмов использовали речную воду, отобранную на расстоянии 10 м от берега и соответствующую требованиям СанПиН 1.2.3685–21 по микробиологическим показателям.

Модельные водоёмы выдерживали в условиях лаборатории при температуре плюс 22 ± 1 °С. Эксперимент по изучению воздействия бензина на санитарно-показательные и патогенные микроорганизмы продолжался 14 сут, мазута — 30 сут. Для исследования отобрано 285 проб воды. Пробы для определения общего микробного числа (ОМЧ) высевали в двух повторностях на чашки Петри по 1 мл глубинным методом с использованием ГРМ-агара. Инкубацию проводили

при температуре плюс 37 ± 1 °С для обнаружения аллохтонной (транзитной) микрофлоры воды и при температуре плюс 22 ± 1 °С для выявления аутохтонной (естественной) микрофлоры. Посев проб воды из модельных водоёмов, заражённых микроорганизмами в виде нативной суспензии и десятикратных разведений, проводили методом мембранной фильтрации с наложением фильтров для определения *E. coli* на хромогенный колиформ-агар, *E. faecalis* — на среду энтерококкагара, *S. typhimurium* и *S. enteritidis* — на среду гектоенагара, *P. aeruginosa* — на цитримидный агар, *S. aureus* — на желточно-солевой агар с последующей инкубацией при температуре плюс 37 ± 1 °С в течение 24–48 ч. Для исследования *Salmonella* spp. использовали метод мембранной фильтрации, не предусмотренный утверждёнными методическими документами, для точного определения количественного содержания микроорганизмов в модельных водоёмах. Обобщение и обработку полученных результатов проводили методом параметрической и непараметрической статистики. Различия величин показателей оценивали по коэффициенту Стьюдента ($t_{\text{эмп}}$), измерение силы и направленности для двух переменных осуществляли по величине коэффициента Спирмена.

Результаты

Полученные результаты исследования свидетельствуют о том, что изменение количества микрофлоры в воде водоёмов с концентрацией ПДК и 10 ПДК бензина имело однонаправленную тенденцию к снижению в течение первых 48 ч ($t_{\text{эмп}} = 2$) и увеличению массы клеток в течение 6–14 сут ($t_{\text{эмп}} = 3$ — зона незначимых изменений). В воде водоёма с концентрацией 100 ПДК бензина в первые 24 ч наблюдалось преимущественное снижение аллохтонной микрофлоры до 89,3%, снижение естественной аутохтонной микрофлоры было менее выражено — в пределах 50,5%. В то же время в водоёме с содержанием 1000 ПДК бензина наблюдалась достоверная гибель как аллохтонной, так и аутохтонной микрофлоры на уровне 92% ($t_{\text{эмп}} = 12$) по сравнению с контролем, которая достигала критических значений к 48 ч эксперимента и приводила к резкому торможению процессов самоочищения воды водоёмов (см. таблицу).

Оставшаяся устойчивая микрофлора в воде опытных водоёмов была способна утилизировать углеводороды и на 6-е сутки эксперимента начинала активно размножаться. В воде водоёма с концентрацией бензина на уровне ПДК и 10 ПДК наблюдалось нарастание массы естественной микрофлоры, превышающей её первоначальный уровень в 4 и 2 раза соответственно, что обеспечивало активизацию процессов самоочищения воды водоёма. В водоёмах с содержанием 100 и 1000 ПДК бензина на 6–14-е сутки скорость отмирания клеток превышала скорость размножения, поэтому процесс самоочищения воды резко замедлился.

Анализ влияния различных концентраций бензина на наличие *E. coli* — санитарно-показательного микроорганизма, определяющего уровень фекального загрязнения воды, выявил

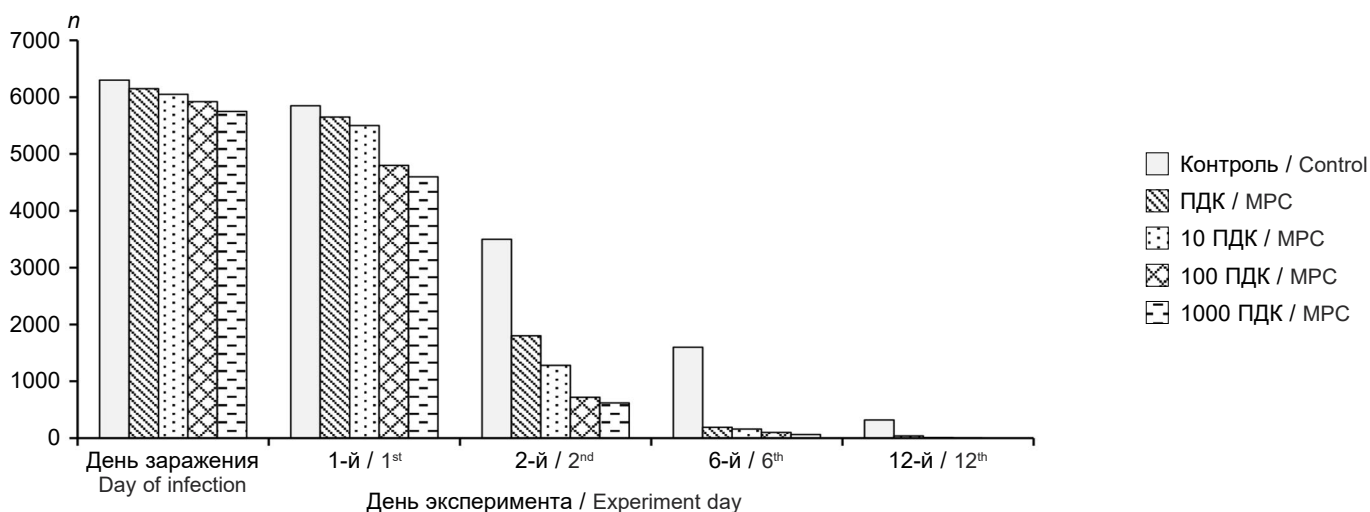


Рис. 1. Количество (n) *E. coli* КОЕ/100 см³ в воде модельных водоёмов с различной концентрацией бензина при инфицирующей дозе 10³ КОЕ/дм³.

Fig. 1. The amount (n) of *E. coli* CFU/100 cm³ in the water of model reservoirs with different concentrations of gasoline at an infectious dose of 10³ CFU/dm³.

ингибирующее влияние бензина на клетки *E. coli* при инфицирующей дозе 10³ КОЕ/дм³, которое нарастало с увеличением времени контакта и концентрации бензина (рис. 1).

В воде водоёма с содержанием бензина на уровне ПДК и 10 ПДК в первые сутки контакта жизнеспособность *E. coli* сохранялась практически на уровне контрольных величин. Влияние бензина на клетки кишечных палочек начинало проявляться на вторые сутки контакта в виде гибели клеток на 49 и 63% соответственно. К 6-м суткам наблюдалась тенденция к снижению числа *E. coli* уже в пределах одного логарифма, а к 12-м суткам выявлено достоверное снижение их количества в пределах 87 и 97% соответственно. Под влиянием бензина в водоёмах выявлена статистически значимая ассоциация между обнаруживаемыми в воде *E. coli* и патогенными микроорганизмами ($R^2 = 0,885$) до 12-х суток эксперимента, что свидетельствует об индикаторной значимости *E. coli* при оценке безопасности воды с концентрацией нефтепродуктов на уровне ПДК и 10 ПДК.

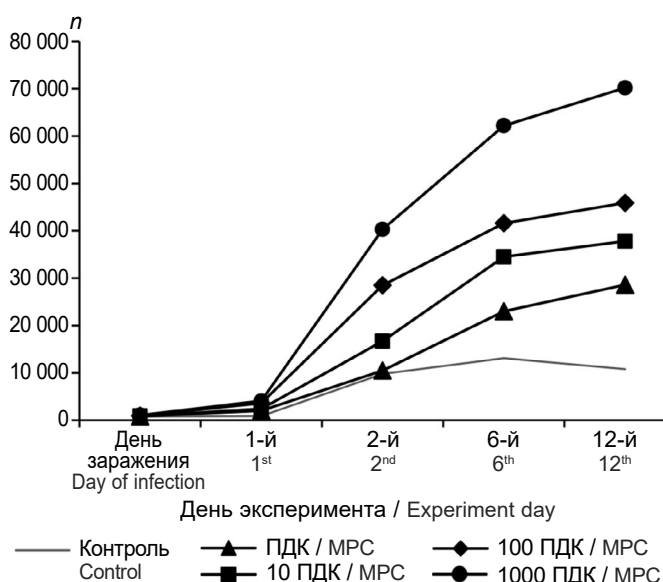


Рис. 2. Динамика количества (n) *P. aeruginosa* (КОЕ/100 см³) в воде модельных водоёмов с содержанием различных концентраций бензина при инфицирующей дозе 10³ КОЕ/дм³.

Fig. 2. Trend (n) in *P. aeruginosa* account (CFU/100 cm³) in the water of model reservoir containing various concentrations of gasoline at an infectious dose of 10³ CFU/dm³.

При увеличении инфицирующей дозы *E. coli* до 10⁴ КОЕ/дм³ в воде опытных водоёмов сопряжённость *E. coli* с патогенными микроорганизмами также сохранялась в течение 12 сут эксперимента. При наличии бензина на уровне 100 и 1000 ПДК наблюдалось прогрессивное снижение числа жизнеспособных клеток *E. coli*, в воде водоёма с заражающей дозой 10² КОЕ/дм³ количество клеток *E. coli* достоверно снижалось на 99% к 6-м суткам эксперимента, при заражающей дозе 10³ КОЕ/дм³ — на 93 и 96% соответственно, при заражающей дозе 10⁴ КОЕ/дм³ — на 97 и 98,5% соответственно ($t_{\text{эмп}} = 12-18$), ассоциативная связь между *E. coli* и патогенными бактериями ослабевала ($R^2 = 0,326$). На 12-е сутки отмечалась полная гибель клеток *E. coli*, реверсии клеток через 48 ч инкубации посевов при температуре плюс 37 ± 1 °C не установлено. Индикаторная значимость *E. coli* как показателя безопасности водного объекта к 6-м суткам эксперимента полностью утрачивалась в водоёмах с концентрацией бензина на уровне 100 и 1000 ПДК.

Оценка влияния различных концентраций бензина на грамположительные кокки выполнена на примере *Enterococcus faecalis* — санитарно-показательного микроорганизма, наличие которого в воде свидетельствует о фекальном загрязнении водоёма. Бензин при попадании в водоём негативно влиял на рост и развитие энтерококков. Количество энтерококков находилось в зависимости от инфицирующей дозы, концентрации нефтепродукта и времени контакта. Тенденция к снижению массы клеток *Enterococcus faecalis* в воде водоёмов с разной концентрацией бензина и временем контакта повторяла тенденцию снижения клеток *E. coli*, выявленную в эксперименте. При инфицирующей дозе *Enterococcus faecalis* 10³ КОЕ/дм³ в воде с концентрацией бензина на уровне ПДК и 10 ПДК сопряжённость *Enterococcus faecalis* с патогенными бактериями сохранялась до 6-х суток ($R^2 = 0,865$). При увеличении инфицирующей дозы *Enterococcus faecalis* до 10⁴ КОЕ/дм³ в воде опытных водоёмов теснота связи с патогенными микроорганизмами сохранялась в течение 12 сут эксперимента. В воде водоёмов при наличии бензина на уровне 100 и 1000 ПДК индикаторная значимость *Enterococcus faecalis* соблюдалась в первые двое суток эксперимента при инфицирующей дозе до 10³ КОЕ/дм³ и 10⁴ КОЕ/дм³.

Результаты экспериментальных исследований по изучению изменения количества *Pseudomonas aeruginosa* в модельных водоёмах с содержанием различных концентраций бензина (заражающая доза модельного водоёма 10³ КОЕ/дм³) представлены на рис. 2.

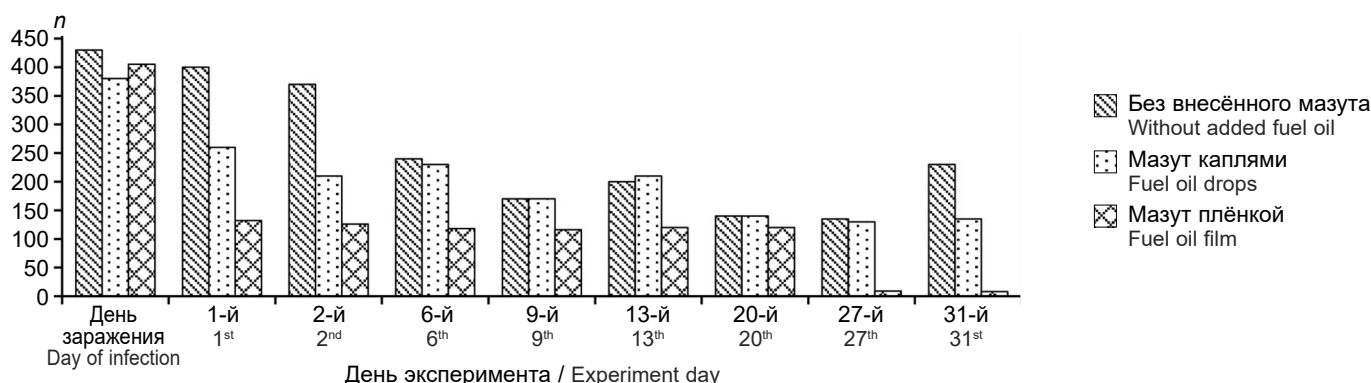


Рис. 3. Жизнеспособность *E. coli* в воде водоёмов при внесении мазута. n – количество *E. coli* КОЕ/100 см³.

Fig. 3. Viability of *E. coli* in water bodies during a fuel oil spill. n – the amount of *E. coli* CFU/100 cm³.

Результаты эксперимента по выявлению *P. aeruginosa* свидетельствуют о наличии прямой зависимости в нарастании массы клеток синегнойной палочки при увеличении концентрации бензина в воде водоёма и времени экспозиции. К 12-м суткам контакта выявлены особенности процесса формирования микробиоты в опытных водоёмах в зависимости от первоначально внесённой дозы клеток по сравнению с уровнем *P. aeruginosa*, определённым в контрольном водоёме. Так, при инфицирующей дозе 10^2 КОЕ/100 см³ наблюдали активный процесс размножения клеток *P. aeruginosa*, превышение массы клеток по сравнению с контролем в воде водоёма с концентрацией бензина на уровне ПДК составило в 9,7 раза, 10 ПДК – в 19,8 раза, 100 ПДК – в 24,4 раза, 1000 ПДК – в 28,7 раза. При увеличении инфицирующей дозы до 10^4 КОЕ/100 см³ в воде водоёма с концентрацией бензина на уровне ПДК выявлено превышение содержания *P. aeruginosa* по сравнению с контрольным водоёмом в 0,9 раза, 10 ПДК – в 1,2 раза, 100 ПДК – в 1,6 раза, 1000 ПДК – в 2,1 раза, что свидетельствует о замедлении процесса размножения клеток *P. aeruginosa* за счёт накопления продуктов обмена веществ клеток и истощения питательных компонентов среды.

Влияние мазута на различные группы микроорганизмов в водной среде изучали в зависимости от его способности распределяться в водной среде. При создании водомазутной эмульсии, то есть при капельном распределении мазута на поверхности среды, динамика поведения *E. coli* характеризовалась тенденцией к снижению роста клеток с первых суток контакта. С 6-х по 20-е сутки жизнеспособность *E. coli* поддерживалась на уровне контроля с последующим снижением биомассы *E. coli* к 20-м суткам на 30,7%, к 31-м суткам эксперимента – на 41% по сравнению с контрольным водоёмом (рис. 3).

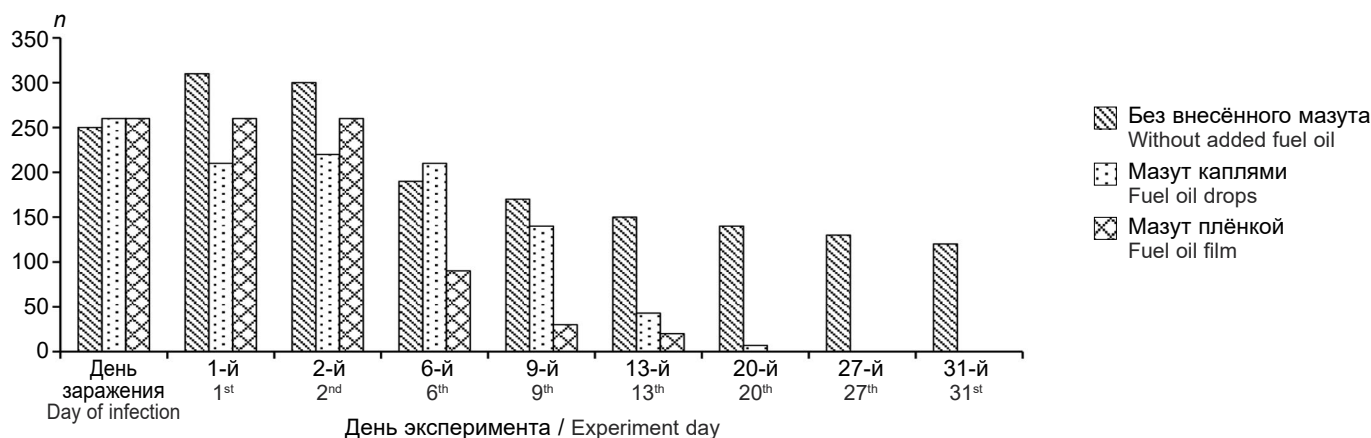


Рис. 4. Жизнеспособность *E. faecalis* в воде водоёмов при разливе мазута. n – количество *E. faecalis* КОЕ/100 см³.

Fig. 4. Viability of *E. faecalis* in water bodies during a fuel oil spill. n – the amount of *E. faecalis* CFU/100 cm³.

В то же время количество *E. faecalis* при капельном распределении мазута определялось на уровне величины биомассы *E. coli*, и только к 13-м суткам наблюдалось резкое снижение числа клеток *E. faecalis* до 71% по отношению к контролю, к 20-м суткам – до 95%. На 27-е сутки эксперимента отмечалась 100%-я гибель *E. faecalis* (рис. 4). Полученные результаты показывают, что мазут оказывал более выраженное угнетающее воздействие на рост и размножение *E. faecalis* по сравнению с *E. coli*.

В условиях, когда мазут разливали по поверхности воды водоёма, в результате чего формировалась тонкая плёнка, наблюдалась тенденция к снижению количества кишечной палочки и энтерококка. Количество *E. coli* снижалось на 96% к 31-му дню наблюдения, *E. faecalis* погибали на 20-е сутки контакта.

Данные эксперимента показывают, что в течение 20 сут при разливе мазута индикаторная значимость *E. faecalis* и *E. coli* сохранялась, о чём свидетельствует возможность обнаружения патогенной микрофлоры в воде. Присутствие мазута в воде, независимо от способа его распределения, приводило к 100%-й гибели клеток *S. aureus* через 48 ч контакта.

Гибель патогенной микрофлоры *S. enterica* отмечалась начиная с 6-х суток эксперимента, при этом снижение количества *S. enterica* в воде достигало 94% при образовании на поверхности тонкой плёнки мазута и 52% – при капельном распределении мазута.

Результаты данного эксперимента свидетельствуют о влиянии углеводов (мазута) в воде на рост и развитие *P. aeruginosa*. Так, к 31-м суткам эксперимента количество *P. aeruginosa* достоверно увеличивалось на 3 логарифма по сравнению с контролем, что свидетельствует об активном использовании в метаболизме клеток *P. aeruginosa* углеводов, способствующих их размножению.

Обсуждение

Экспериментальными исследованиями доказано усиление неблагоприятного влияния бензина и мазута на состояние естественной микрофлоры воды. Выраженность снижения аутохтонной и аллохтонной микрофлоры находилась в зависимости от увеличения концентрации нефтепродукта и времени контакта.

При концентрации бензина на уровне ПДК процессы самоочищения водоёма протекали активно, жизнеспособность микрофлоры не только сохранялась, но наблюдалось размножение микроорганизмов. В водоёмах с концентрацией бензина 10 ПДК процесс самоочищения воды снижался, а при концентрациях 100 и 1000 ПДК характеризовался как крайне низкий.

Повышенные концентрации нефтепродуктов до 10 ПДК при попадании в воду водоёмов приводили к ингибированию роста санитарно-показательных микроорганизмов *E. coli* и *E. faecalis* — показателей «золотого стандарта» оценки уровня фекального загрязнения воды. Под влиянием бензина в воде водоёмов *E. coli* и *E. faecalis* сохраняли ассоциативную связь с патогенными микроорганизмами до 12 сут экспозиции, подтверждая индикаторную значимость показателей.

При капельном разливе мазута обеспечивалось поддержание индикаторной значимости у *E. coli* до 31 сут, при разливе в виде тонкой плёнки — до 6 сут, у *E. faecalis* — до 20 и 13 сут соответственно. Процессы отмирания *E. coli*, *E. faecalis*, *S. enterica* происходили быстрее в модельных водоёмах с мазутом, образующим плёнку на поверхности воды, чем в водоёмах с водомазутной эмульсией.

Удлинение срока выживания диких штаммов *E. coli* и *E. faecalis* в эксперименте с воздействием мазута характеризует их как более устойчивые по сравнению с музейными штаммами, использованными в эксперименте с бензином.

При концентрации 100 и 1000 ПДК бензина санитарно-показательные микроорганизмы в воде водоёмов к 6-м суткам теряли способность адекватно отражать степень опасности водоёма по показателю фекального загрязнения.

Для оценки влияния различных концентраций бензина и мазута на качество модельных водоёмов в эксперименте использован показатель *Pseudomonas aeruginosa*, поскольку в настоящее время этот микроорганизм является дополнительным индикаторным показателем при оценке безопасности питьевой воды и воды водных объектов согласно СанПиН 1.2.3685–21¹ и основным микробиологическим показателем согласно ТР ЕАЭС 044/2017 «О безопасности упакованной питьевой воды, включая природную минеральную воду»².

² Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности упакованной питьевой воды, включая природную минеральную воду» (ТР ЕАЭС 044/2017) (с изменениями на 5 октября 2021 г.). Принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 23 июня 2017 г. № 45.

Способность *Pseudomonas aeruginosa* использовать для своего метаболизма углеводороды приводила к сохранению жизнедеятельности и стимулированию роста клеток в воде водоёмов, содержащих нефтепродукты. По данным О.А. Гоголева и Н.В. Немцева [10], у бактерий *Pseudomonas* гидрофильная клеточная стенка бедна липидами, и гидрофобные углеводороды не могут проникнуть через этот барьер. Выделяя во внешнюю среду биоэмульгатор, эти микроорганизмы снижают гидрофобность углеводородов и способствуют их солюбилизации. Эмульгатор *Pseudomonas* представляет собой пептидогликолипид, в состав которого входят нормальные жирные кислоты, рамноза и аминокислоты [10].

Достоверное увеличение биомассы бактерий *Pseudomonas aeruginosa* находилось в зависимости от концентрации нефтепродуктов и времени экспозиции. Количество клеток *Pseudomonas aeruginosa* обнаружено в большем количестве в воде водоёмов с распределением мазута на поверхности в виде плёнки, чем в водоёмах с водомазутной эмульсией. Увеличение содержания в водном объекте *Pseudomonas aeruginosa*, показателя, обладающего высоким антагонистическим потенциалом, создаёт методические трудности в определении других индикаторных микроорганизмов безопасности воды. Накопление *Pseudomonas aeruginosa* в водном объекте, содержащем нефтепродукты, повышает опасность водоёма для хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, может увеличивать потенциальный риск для здоровья человека.

Заключение

При значительной концентрации нефтепродуктов в водном объекте при аварийных ситуациях, сбросе недостаточного очищенных сточных вод нефтеперерабатывающих предприятий контроль безопасности воды водоёмов целесообразно проводить, ориентируясь на санитарно-показательные микроорганизмы *E. coli* и *E. faecalis*. При длительном поступлении в воду водоёмов высоких концентраций нефтепродуктов мониторинг безопасности следует вести по формированию углеводородокисляющих бактерий, в том числе *Pseudomonas aeruginosa*.

Увеличение содержания в водном объекте *Pseudomonas aeruginosa*, показателя, который обладает высоким антагонистическим потенциалом, создаёт методические трудности в определении других индикаторных микроорганизмов — показателей безопасности воды.

Сложившаяся ситуация указывает на необходимость разработки унифицированной системы оценки качества и безопасности водных объектов, учитывающей региональную специфику загрязнения нефтепродуктами, что позволит получить полноценную характеристику санитарного состояния объектов с целью определения характера и объёма краткосрочных и долгосрочных профилактических мероприятий по оздоровлению среды обитания и снижению риска заболеваемости населения ОКИ.

Литература

1. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2024 году». М.; 2025.
2. Конева М.И., Ступинкова Н.А. Нефтеокисляющие микроорганизмы как индикаторы нефтяного загрязнения водотока г. Петропавловска-Камчатского. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021; (7–2): 23–7. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.109.7.037> <https://elibrary.ru/liifnd>
3. Laffon B., Páraso E., Valdíglesias V. Effects of exposure to oil spills on human health: Updated review. *J. Toxicol. Environ. Health B. Crit. Rev.* 2016; 19(3–4): 105–28. <https://doi.org/10.1080/10937404.2016.1168730>
4. Laffon B., Aguilera F., Ríos-Vázquez J., Valdíglesias V., Páraso E. Follow-up study of genotoxic effects in individuals exposed to oil from the tanker Prestige, seven years after the accident. *Mutat. Res. Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.* 2014; 760: 10–6. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2013.09.013>
5. Ayedun H., Jaiyeola O.O., Onigbinde S.O., Folarin O.M., Oyedele A.O. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in crude oil-contaminated water and soil and their removal using locally available plant materials. *Water Pract. Technol.* 2024; 19(10): 3956–71.
6. Шамраев А.В., Шорина Т.С. Влияние нефти и нефтепродуктов на различные компоненты окружающей среды. *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2009; (6): 642–3. <https://elibrary.ru/mnkvrv>
7. Жолтаев Г.Ж., Товасаров А.Д., Нурсултанова С.Г., Альжанова Ж.Г. Влияние нефти и нефтепродуктов на окружающую природную среду. *Вестник КазНТУ*. 2015; (4): 43–6.
8. Оказова З.П., Автаева Т.А. Использование микроорганизмов в качестве индикаторов загрязнения окружающей среды. *Современные проблемы науки и образования*. 2015; (5): 636. <https://elibrary.ru/yitgsg>
9. Бойченко Т.В., Христофорова Н.К., Бузолёва Л.С. Микробная индикация прибрежных вод северной части Амурского залива. *Известия ТИНРО*. 2009; 158: 324–32. <https://elibrary.ru/kymwsn>
10. Ильинский В.В., Поршнева О.В., Комарова Т.И., Коронелли Т.В. Углеводородокисляющие бактериоценозы незагрязнённых пресных вод и их изменения под влиянием нефтяных углеводородов (на примере юго-восточной части Можайского водохранилища). *Микробиология*. 1998; (2): 267–73.

11. Гоголева О.А., Поршнева О.В. Углеродородокисляющие микроорганизмы природных экосистем. *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН*. 2012; (2): 1–7. <https://elibrary.ru/rffawz>
12. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»; 2021.

References

1. State report "On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Russian Federation in 2024". Moscow; 2025. (in Russian)
2. Koneva M.N., Stupnikova N.A. Oil-oxidizing microorganisms as indicators of oil pollution of watercourses of Petropavlovsk-Kamchatsky. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2021; (7–2): 23–7. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.109.7.037> <https://elibrary.ru/lifjnd> (in Russian)
3. Laffon B., Pávaro E., Valdiglesias V. Effects of exposure to oil spills on human health: Updated review. *J. Toxicol. Environ. Health B. Crit. Rev.* 2016; 19(3–4): 105–28. <https://doi.org/10.1080/10937404.2016.1168730>
4. Laffon B., Aguilera F., Ríos-Vázquez J., Valdiglesias V., Pávaro E. Follow-up study of genotoxic effects in individuals exposed to oil from the tanker Prestige, seven years after the accident. *Mutat. Res. Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.* 2014; 760: 10–6. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2013.09.013>
5. Ayedun H., Jaiyeola O.O., Onigbinde S.O., Folarin O.M., Oyediji A.O. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in crude oil-contaminated water and soil and their removal using locally available plant materials. *Water Pract. Technol.* 2024; 19(10): 3956–71.
6. Shamraev A.V., Shorina T.S. The influence of oil and oil products on various components of the environment. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2009; (6): 642–3. <https://elibrary.ru/mnkvrw> (in Russian)
7. Zholtaev G.Zh., Tovasarov A.D., Nursultanova S.G., Alzhanova Zh.G. The influence of oil and petroleum products on the environment. *Vestnik KazNTU*. 2015; (4): 43–6. (in Russian)
8. Okazova Z.P., Avtaeva T.A. The usage of microorganisms as indicators of environmental pollution. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015; (5): 636. <https://elibrary.ru/ytigsg> (in Russian)
9. Boychenko T.V., Khristohorova N.K., Buzoleva L.S. Microbial indication of coastal waters in the northern amur bay. *Izvestiya TINRO*. 2009; 158: 324–32. <https://elibrary.ru/kymwsn> (in Russian)
10. Ilinskii V.V., Porshneva O.V., Komarova T.I., Koronelli T.V. Hydrocarbon-oxidizing bacteriocenoses of unpolluted fresh waters and their changes under the influence of petroleum hydrocarbons (using the southeastern part of the Mozhaik Reservoir as an example). *Mikrobiologiya*. 1998; (2): 267–73. (in Russian)
11. Gogoleva O.A., Nemtseva N.V. Hydrocarbon-oxidizing microorganisms in natural ecosystems. *Byulleten' Orenburgskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*. 2012; (2): 1–7. <https://elibrary.ru/rffawz> (in Russian)
12. Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation No. 2 "On approval of sanitary rules and regulations SanPiN 1.2.3685–21 "Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans"; 2021.

Сведения об авторах

Трухина Галина Михайловна, доктор мед. наук, профессор, зав. отд. микробиологических методов исследования окружающей среды ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: trukhina@list.ru

Борисова Наталья Андреевна, науч. сотр. отд. микробиологических методов исследования окружающей среды ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: borisova.na@fncg.ru

Синицына Оксана Олеговна, доктор мед. наук, профессор, член-корр. РАН, зам. директора по научной работе ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Россия. E-mail: sinitsyna.oo@fncg.ru

Information about the authors

Galina M. Trukhina, DSc (Medicine), professor, head, Department of microbiological methods of environmental research of the Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9955-7447> E-mail: trukhina@list.ru

Natalya A. Borisova, researcher, Department of Microbiological Methods of Environmental Research, FBUN "FNTSG named after F.F. Erisman" Rosпотребнадзор, 141014, Moscow Region, Mytishchi, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1622-1652> E-mail: borisova.na@fncg.ru

Oxana O. Sinitsyna, DSc (Medicine), professor, corresponding member of the RAS, Deputy Director of the Federal Scientific Center for Hygiene named after F.F. Erisman, Mytishchi, 141014, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0241-0690> E-mail: sinitsyna.oo@fncg.ru