



Пай Г.В.¹, Новожилов К.А.¹, Курбатова И.В.¹, Мания Т.Р.^{1,2}, Юдин С.М.¹,
Загайнова А.В.¹

Сравнительный анализ патогенного потенциала бактериальных изолятов семейства *Enterobacteriaceae*, выделенных из сточных и поверхностных вод Москвы после очистных сооружений

¹ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью»
Федерального медико-биологического агентства, 119121, Москва, Россия;

²ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», 117198, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Недоочищенные сточные воды несут большую угрозу здоровью людей и окружающей среде. Не все очистные сооружения эффективно справляются со своей задачей.

Цель работы — сравнение патогенного потенциала бактериальных изолятов семейства *Enterobacteriaceae*, выделенных из сточных и поверхностных вод Москвы после очистных сооружений (ОС).

Материалы и методы. Отбор образцов воды проводили на ОС на этапах очистки (вход, после цикла очистки, сбросовый канал) и из поверхностных вод (выше и ниже по течению от точки сброса с ОС). Исследования проводили на ОС Москвы: Зеленоградских очистных сооружениях (ЗОС), очистных сооружениях «Южное Бутово» (ЮБОС), Люберецких очистных сооружениях (ЛОС) и Курьяновских очистных сооружениях (КОС). Для детекции потенциально патогенных детерминант использовали метод ПЦР.

Результаты. Установлено, что изоляты, выделенные из исследованных образцов воды ОС, имеют более высокий патогенный потенциал, чем изоляты, выделенные из кала. Гены устойчивости к антибиотикам встречаются у 7,5% изолятов *E. coli*, выделенных только из образцов воды ОС. Патогенные детерминанты достоверно чаще встречались в изолятах из образцов воды ОС (*mrkD* и *kfi* — для *Klebsiella*, *aggR* и *ipaH* — для *E. coli*). Все станции снижали количество изолятов после цикла очистки (для *E. coli* — в 2–11 раз, для клебсиелл — в 2–4 раза), кроме ЮБОС, где количество изолятов клебсиелл снижалось всего на 15%, а *E. coli* даже возрастало на 14%.

Ограничения исследования. Изучали изоляты семейства *Enterobacteriaceae* из ОС Москвы и кала людей (К), из рода *Klebsiella* (157 СВ и 117 К-изолятов) и *Escherichia coli* (100 СВ и 80 К-изолятов) изолятов. Выборка ограничена по географии, поэтому выводы можно применять к ОС Москвы и Московской области (или сходных географических и экологических условий), где используют сходные схемы очистки.

Заключение. В целом в сточных водах (в том числе неочищенных) из ОС Москвы выделены бактериальные изоляты семейства *Enterobacteriaceae*, имеющие больший патогенный потенциал, чем у изолятов, выделенных из кала людей. При этом установлено, что в результате очистки воды на очистных сооружениях Москвы (кроме ЮБОС) снижается на четыре порядка уровень бактериального загрязнения сточных вод представителями бактерий семейства *Enterobacteriaceae*, однако у жизнеспособных изолятов, выделенных в сбросном канале и в поверхностных водах ниже спуска сточных вод из ОС, снижение патогенного потенциала не зафиксировано.

Ключевые слова: *Escherichia coli*; *Klebsiella*; *Enterococcus*; патогенность; сточные воды; очистные сооружения

Соблюдение этических стандартов. Исследование биологического материала от людей было одобрено Локальным независимым этическим комитетом (протокол № 98А заседания Локального независимого этического комитета ФГБУ «ГНЦК им. А.Н. Рыжих» Минздрава России от 16.07.2018 г.).

Для цитирования: Пай Г.В., Новожилов К.А., Курбатова И.В., Мания Т.Р., Юдин С.М., Загайнова А.В. Сравнительный анализ патогенного потенциала бактериальных изолятов семейства *Enterobacteriaceae*, выделенных из сточных и поверхностных вод Москвы после очистных сооружений. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(11): 1407–1417. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-11-1407-1417> <https://elibrary.ru/lggjza>

Для корреспонденции: Мания Тамари Резоевна, e-mail: maniya@csfpmba.ru

Участие авторов: Пай Г.В. — концепция и дизайн исследования, выполнение экспериментальной работы молекулярно-генетическим методом, статистическая обработка, написание текста, редактирование; Новожилов К.А. — выделение бактериальных изолятов, идентификация бактерий; Курбатова И.В. — культивирование и изучение биологических свойств бактерий; Мания Т.Р. — сбор материала, редактирование; Юдин С.М. — редактирование, утверждение окончательного варианта статьи; Загайнова А.В. — концепция и дизайн исследования, редактирование, сохранение бактериальных изолятов. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

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

Финансирование. Исследование проведено в рамках НИР «Разработка унифицированных методов, включающих отбор проб, для осуществления определения микробиологического и паразитологического загрязнения сточных вод». Госконтракт 12.11.2021 № 212338810015200000000000/145.001.216 (шифр «Сточные воды»).

Поступила: 18.02.2025 / Поступила после доработки: 25.04.2025 / Принята к печати: 26.06.2025 / Опубликовано: 19.12.2025

Galina V. Pay¹, Konstantin A. Novozhilov¹, Irina V. Kurbatova¹, Tamari R. Maniya^{1,2},
Sergey M. Yudin¹, Angelika V. Zagaynova¹

Comparative analysis of the pathogenic potential of bacterial isolates of the *Enterobacteriaceae* family isolated from wastewater and surface waters after wastewater treatment plants in Moscow

¹Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation;

²Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, 117198, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Untreated wastewater poses a significant threat to public health and the environment. Not all treatment facilities are equally effective.

Purpose of the study. Comparison of the pathogenic potential of bacterial isolates of the *Enterobacteriaceae* family isolated from wastewater and surface water after treatment facilities (TF) in Moscow.

Materials and methods. Water samples were collected at the TF (inlet, post-treatment, and discharge) and from surface waters (upstream and downstream of the TF discharge point). Studies were conducted at Moscow's TF: Zelenograd Wastewater Treatment Plant (ZWTP), Yuzhnoye Butovo Wastewater Treatment Plant (YUBOTWTP), Lyubertsy Wastewater Treatment Plant (LOS), and Kuryanovsk Wastewater Treatment Plant (KOS). PCR was used to detect potentially pathogenic determinants.

Results. Isolates recovered from the analyzed water samples at the TF were established to have a higher pathogenic potential than isolates isolated from feces (F). Antibiotic resistance genes were found in 7.5% of *E. coli* isolates isolated only from the TF. Pathogenic determinants were significantly more common in isolates from the TF (mrkD and CFU for *Klebsiella*, aggR and ipaH for *E. coli*). All stations reduced the number of isolates after the treatment cycle (2–11 times for *E. coli* and 2–4 times for *Klebsiella*), except for YUBOS, where the number of *Klebsiella* isolates decreased by only 15%, while *E. coli* even increased by 14%.

Limitations. We studied isolates of the *Enterobacteriaceae* family from Moscow TF and human feces (F) from the genus *Klebsiella* (157 wastewater and 117 F isolates) and *Escherichia coli* (100 wastewater and 80 F isolates), which represents a sufficient reference sample.

Conclusion. Overall, bacterial isolates of the *Enterobacteriaceae* family have been isolated from wastewater (including untreated wastewater) from Moscow's wastewater treatment plants (WWTPs) and have a higher pathogenic potential than isolates recovered from human feces. Furthermore, water treatment at Moscow's wastewater treatment plants (except for the YUBOTWTP) has been shown to reduce the level of bacterial contamination of wastewater by *Enterobacteriaceae* by four orders of magnitude. However, no reduction in pathogenic potential has been observed in viable isolates recovered from the discharge channel or from surface waters downstream of the WWTPs discharge.

Keywords: *Escherichia coli*; *Klebsiella*; *Enterococcus*; virulence; wastewater treatment plants

Compliance with ethical standards. The study of biological material from humans was approved by the Local Independent Ethics Committee (Minutes No. 98A of the meeting of the Local Independent Ethics Committee of the National Medical Research Center of Coloproctology named after A. N. Ryzhikh, dated 07/16/2018).

For citation: Pai G.V., Pankova M.A., Fedets Z.E., Mania T.R., Yudin S.M., Zagainova A.V. Comparative analysis of the pathogenic potential of bacterial isolates of the *Enterobacteriaceae* family isolated from waste water and surface waters after wastewater treatment plants in Moscow. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(11): 1407–1417. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-11-1407-1417> <https://elibrary.ru/lggiza> (In Russ.)

For correspondence: Tamari R. Maniya, e-mail: maniya@cspfmba.ru

Contribution. Pay G.V. — research concept and design, experimental work, statistical processing, text writing, editing; Kurbatova I.V. — collection and processing of samples, bacterial cultivation; Novozhilov K.A. — collection and processing of samples, bacterial cultivation; Mania T.R. — collection of material, editing; Yudin S.M. — editing, approval of the final version of the article; Zagainova A.V. — concept and design of the study, editing, approval of the final version of the article. 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 research project “Development of standardized methods, including sampling, for determining microbiological and parasitological contamination of wastewater.” State contract No. 212338810015200000000000/145.001.216 (code “Wastewater”), November 12, 2021.

Received: February 18, 2025 / Revised: April 25, 2025 / Accepted: June 26, 2025 / Published: December 19, 2025

Введение

Бытовые сточные воды содержат сложную смесь биологических и химических загрязнений. Важная часть биологического загрязнения — фекальные загрязнения, которые негативно влияют на окружающую среду и несут биологическую угрозу здоровью человека. Предотвратить эту угрозу возможно с помощью очистки бытовых сточных вод на специальных очистных сооружениях (ОС). Важный механизм возникновения инфекции человека (кроме внутрибольничных инфекций) — заражение при попадании с пищей и питьем при фекальном загрязнении воды микроорганизмами, обладающими патогенным потенциалом. В связи с этим для общественного здоровья важно исследование эффективности очистки бытовых сточных вод для уменьшения общего количества бактерий и снижения патогенного потенциала.

В настоящей работе представлен сравнительный анализ эффективности ОС Москвы и Московской области на основе определения патогенного потенциала бактериальных изолятов двух представителей семейства *Enterobacteriaceae*, которые

контролируются в обеззараженных сточных водах в соответствии с действующими СанПиН 1.2.3685–21¹ и входят в индикаторную группу «обобщённые колиформные бактерии» (ОКБ) и индикаторный показатель *E. coli*. По данным ВОЗ, к инфекционным болезням, которыми ежегодно в России заражаются люди, относятся и клебсиеллёз. Исследование этих двух показателей обусловлено и тем, что бактерии рода *Klebsiella* были причислены в феврале 2019 г. к наиболее опасным в связи с приобретением высокой резистентности к существующим антибактериальным препаратам [1].

Первый представитель семейства *Enterobacteriaceae* — *Escherichia coli*, способная размножаться только в кишечнике человека и животных и служащая индикатором свежего фекального загрязнения [2]. Другой представитель — *Klebsiella* spp., колонизирующая различные экологические ниши, обитающая в воде, почве, на растениях, а также в кишечнике

¹ СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

и дыхательных путей человека и животных [3]. Сравнивали патогенный потенциал ещё одного представителя кишечной микрофлоры — энтерококка, изучение изолятов которого описано ранее [4]. Энтерококк является оппортунистическим условно патогенным микроорганизмом и часто расценивается как показатель более старого фекального загрязнения.

Escherichia coli и *Klebsiella* spp. являются комменсальными участниками нормальной микробиоты человека и животных, способны вызывать оппортунистические инфекции на фоне сниженного иммунитета, имея в геноме различные детерминанты патогенности (устойчивость к антибиотикам, способность к адгезии и инвазии в ткани слизистых, выделению токсинов и др.). Часто изоляты условно патогенных микроорганизмов с патогенными детерминантами встречаются в окружающей среде [5].

Актуальность темы исследования подтверждена литературными данными: в разных регионах исследования природных вод, загрязнённых недоочищенными и необеззараженными сточными водами, показывают присутствие в них бактерий семейства *Enterobacteriaceae*, обладающих патогенным потенциалом. Быстрый, удобный и эффективный скрининг для выявления патогенности часто выполняют молекулярно-генетическими методами (ПЦР) с детекцией потенциально вирулентных патогенных детерминант [6–11].

Так, исследования природных и городских сточных вод в районе Ростова-на-Дону показали наличие у бактериальных изолятов семейства *Enterobacteriaceae* разнообразных генов антибиотикостойчивости (к бета-лактамам, ванкомицину и, чаще всего, эритромицину), более половины образцов сточных городских вод содержали бактерии рода *Klebsiella* [12, 13]. Изоляты с патогенной активностью (например, гемолизирующие) обнаружены в местах антропогенного загрязнения водоёмов [14].

В Пермском крае фекальное загрязнение (на примере энтеровирусов) выявлено в 2–3% открытых водоёмов и возросло до 20% в пробах воды из зоны сброса хозяйственно-бытовых сточных вод [15]. Также показано загрязнение питьевой воды городских водоснабжающих систем (0,8% образцов).

Микробиоценоз природных вод реки Лены в местах антропогенного загрязнения представлен бактериями семейства *Enterobacteriaceae* (доминирует *Escherichia coli*, выявляются также *Enterobacter* spp. и *Klebsiella* spp.), причём повышается частота выявления у условно патогенных бактерий генов антибиотикорезистентности и других патогенных детерминант (*hlyA* и *sfaG*) [16]. Превышение допустимого количества нормируемых условно патогенных бактерий выявлено в природных водах разных регионов и стран: энтерококки — в Сырдарье [17], энтерококки и *Escherichia* — в Калининградском заливе [18]. Системы питьевого водоснабжения фермерских хозяйств Омской области были загрязнены энтерококками и бактериями группы кишечной палочки с высокой долей (25–11% соответственно) патогенных гемолитических и мультирезистентных изолятов [19]. Метагеномные исследования сточных вод Москвы [20] показали высокое содержание генов антибиотикостойчивости у представителей бактерий семейства *Enterobacteriaceae*: *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Klebsiella oxytoca*, *Salmonella enterica*, а также у бактерий семейства *Enterococcaceae* (≈ 2 гена на геном). Полученные данные разных исследователей подтверждают, что эффективность очистки сточных вод влияет как на количественное содержание бактерий, так и на разнообразие патогенных детерминант. Вышеперечисленные данные стали гипотезой настоящего исследования, призванного показать, что во многих случаях ОС не справляются с очисткой сточных вод от фекального загрязнения с достаточной эффективностью.

Цель исследования — сравнительный анализ патогенного потенциала бактериальных изолятов семейства *Enterobacteriaceae*, выделенных из сточных и поверхностных вод после очистных сооружений Москвы, и микробиоты, выделенной из кала здоровых лиц.

Материалы и методы

Отбор исходных проб воды. Отбор проб сточных и поверхностных вод проводили на четырёх очистных сооружениях Москвы и Московской области: Зеленоградских очистных сооружениях (ЗОС), очистных сооружениях «Южное Бутово» (ЮБОС), Люберецких очистных сооружениях (ЛОС) и Курьяновских очистных сооружениях (КОС) по точкам отбора для мониторинга.

Пробы воды отбирали в соответствии с ГОСТ 31942–2012 (ISO 19458:2006)². Определяли показатели согласно МУК 4.2.3721–21³ и МУ 2.1.5.3692–21⁴. Пробоподготовку проводили фильтрационным методом (по 1; 10 и 100 см³) и методом прямого посева из разведений (по 100 мкл на чашку Петри) в соответствии с МУК 4.2.1884–04⁵. На основании выполненных исследований разработаны методы отбора проб, пробоподготовки и методов, вошедших в ГОСТ Р 71327–2024⁶.

В среднем из каждой станции в течение 2022–2023 гг. выполнено не менее 10 отборов проб: ЗОС — 13, КОС — 12, ЛОС — 11, ЮБОС — 14. Пункты отбора: 1 — точка входа (сразу после решёток); 2 — точка отбора активного ила (аэротенки); 3 — точка после полного цикла очистки; 4 — точка «сбросовый канал» (водовыпуск); 5 — точка «река до водовыпуска»; 6 — точка «река после водовыпуска».

Характеристика станций очистных сооружений. Две станции (КОС и ЛОС) имеют большую производительность (3000 м³/сут), две другие (ЗОС и ЮБОС) — менее мощные (140 и 80 м³/сут соответственно). Технологически процесс очистки сточных вод в целом сходен на всех станциях. Он имеет несколько этапов: решётки, песколовки-жировловки, первичные отстойники, аэротенки, вторичные отстойники, фильтры доочистки и УФ-обеззараживание. Отличия заключаются в том, что на мощных станциях (КОС и ЛОС) применяется аэротенк с технологией удаления биогенных элементов, а на менее производительных — биореактор для удаления фосфора и аэротенк с нитриденитрификацией [4].

Отбор образцов биологического материала кала. Исследовали бактериальные культуры, высеянные из фекалий людей I группы здоровья (относительно здоровые, то есть хронических болезней нет, сердечно-сосудистый риск низкий или умеренный) в количестве 365 культур от 168 человек. Критерии включения пациентов для I группы здоровья: возраст старше 18 лет, отсутствие жалоб на функционирование желудочно-кишечного тракта, нормальный стул, отсутствие антибиотикотерапии в течение последних трёх месяцев. Все пациенты дали письменное информированное согласие на сбор материала и проведение исследования.

Исследование биологического материала от людей одобрено Локальным независимым этическим комитетом (протокол № 98А заседания Локального независимого этического комитета ФГБУ «ГНЦК им. А.Н. Рыжих» Минздрава России от 16.07.2018 г.).

Бактериальные изоляты. Изоляты выделяли из образцов сточных вод (СВ) и кала людей I группы здоровья (К) культуральным методом на плотных дифференциальных средах: Эндо (HiMedia, Индия), Агар ВСР (Conda, Испания), Chromocult Conform Agar (Merk, Германия). Идентификацию проводили с применением матрично-активированной лазерной десорбции (ионизации) с времяпролётной масс-

² ГОСТ 31942–2012 (ISO 19458:2006) «Вода. Отбор проб для микробиологического анализа».

³ МУК 4.2.3721–21 «Изменения № 3 в МУК 4.2.1884–04 04 «Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов».

⁴ МУ 2.1.5.3692–21 «Изменения № 1 в МУ 2.1.5.800–99 «Организация госсанэпиднадзора за обеззараживанием сточных вод».

⁵ МУК 4.2.1884–04 «Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов».

⁶ ГОСТ Р 71327–2024 «Качество воды. Методы определения санитарно-микробиологических и санитарно-паразитологических показателей по оценке воды поверхностных водных объектов и сточных вод».

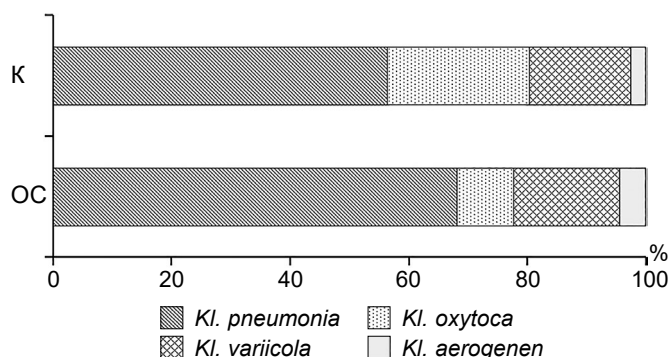


Рис. 1. Видовое разнообразие изолятов *Klebsiella* в сточных водах (OC) и кале (K) здоровых людей.

Fig. 1. Species diversity of *Klebsiella* isolates in wastewater (OC) and feces (K) in healthy individuals.

спектрометрией (Microflex Biotyper MALDI-TOF MS, Bruker, Германия). Исследовали изоляты представителей семейства *Enterobacteriaceae*: род *Klebsiella* (157 СВ и 117 К-изолятов) и *Escherichia coli* (100 СВ и 80 К-изолятов). Данные о роде *Enterococcus* (366 СВ и 168 К-изолятов) цитируются с целью метаанализа и обсуждения по нашей предыдущей работе [4].

Выделение ДНК. Культивированные на плотной среде колонии ресуспендировали в 0,5 мл стерильного физраствора, собирали центрифугированием 10 мин при 3000 g, осадок промывали ещё раз стерильным физраствором, добавляли 200 мкл стерильного физраствора и лизировали 15-минутным прогреванием при температуре плюс 70 °С. Клеточный дебрис осаждали центрифугированием 10 мин при 3000 g, а надосадочную жидкость, содержащую бактериальную ДНК, использовали для ПЦР.

ПЦР-анализ. ПЦР-анализ выполняли на приборе Bio-Rad Thermal Cycler T100 (Bio-Rad Laboratories, Inc.) с использованием набора реактивов для ПЦР с Taq-полимеразой (PK114, Евроген) согласно протоколу производителя. ДНК, выделенную из бактериальных изолятов, тестировали на наличие генов, характерных для патогенных штаммов этого рода бактерий.

Выделенные изоляты *E. coli* были охарактеризованы на принадлежность к различным группам диарогенных эшерихий (энтеропатогенных ЕРЕС, энтеротоксичных ЕТЕС, энтероинвазивных ЕИЕС, энтерогеморрагических ЕНЕС, энтероадгезивных ЕАгЕС). Анализ проводили с помощью коммерческих ПЦР-наборов «АмплиСенс® Эшерихиозы-FL». Выявление и дифференциация диарогенных эшерихий производства ЦНИИЭ Роспотребнадзора согласно инструкции производителя. Конкретные исследованные гены, кодирующие вирулентные белки *E. coli*, включали в основном разнообразные токсины (9 генов): термостабильные (*STI*, *STII*) и термолabileльные (*LTI*, *LTII*), цитотоксические некротизирующие факторы (*CNF1*, *CNF2*) и веротоксин типов 1, 2 и 2e (*VT1*, *VT2* и *VT2e*), а также 2 гена, отвечающих за адгезию (*Eagg*) и инвазию (*Einv*). Для исследований использовали синтезированные олигонуклеотиды и программы амплификации, описанные в работе F. Compain и соавт. [21].

Вирулентность штаммов рода *Klebsiella* определяли по наличию генов, отвечающих за следующие функции: адгезию (*mrkD*), транспорт железа (*ybtS*, *kfu*, *iutA*), гипермукоидный фенотип (*magA*, *rpmA*, *k2*) и метаболизм аллантаина (*allS*). Специфические олигонуклеотиды для детекции генов: *mrkD*, *ybtS*, *kfu*, *iutA*, *magA*, *rpmA*, *k2*, описаны в [19, 22].

Потенциал резистентности к антибиотикам оценивали для изолятов *E. coli* и *Klebsiella* путём детектирования генов металло-β-лактамаз (*IMP*, *VIM*, *NDM*); β-лактамаз, ингибируемых клавулановой кислотой (*KPC*), и оксациллина расширенного спектра (*OXA-48*). Анализ проводи-

ли с помощью коммерческих ПЦР-наборов «АмплиСенс® MDR MBL-FL» (гены *IMP*, *NDM*, *VIM*), «АмплиСенс® MDR KPC/OXA-48-FL» (гены *KPC*, *OXA-48*) производства ЦНИИЭ Роспотребнадзора согласно инструкции производителя.

Статистический анализ. Анализ статистической достоверности различий между группами изолятов представленности патогенных детерминант выполняли с помощью программного обеспечения Statistica (Statsoft, Dell) методом критерия согласия Пирсона χ^2 (хи-квадрат).

Результаты

Сравнение в целом выборок изолятов из очистных сооружений и кала. Сравнение видового состава. В отличие от *E. coli*, индикатора фекального загрязнения, колонизирующей кишечник человека и животных, представители рода *Klebsiella* занимают различные экологические ниши, в том числе циркулируют в поверхностных водах. Это может приводить к различному видовому составу исследуемых выборок ОС и кала. Видовую принадлежность определяли с помощью масс-спектрометрической системы Bruker MALDI biotyper. Бактериальные изоляты *Klebsiella* выделены из сточных вод в следующей пропорции: *K. pneumonia* > *K. variicola* > *K. oxytoca* > *K. aerogenes* (рис. 1). Различия между изолятами из сточных вод и изолятами из кала наблюдались только по виду *K. oxytoca* — в кале она встречается в 2,5 раза чаще. Эти различия оказались статистически достоверными: $\chi^2 = 8,24$, $p < 0,05$ ($p = 0,042$). Разброс в видовом разнообразии *Klebsiella* между различными ОС незначителен. Везде мажорным видом являлась *K. pneumonia* (65–71% от общего числа изолятов клебсиелл на данном ОС), далее *K. variicola* (16–19%) и *K. oxytoca* (7–11%). Наибольший разброс наблюдался в представленности *K. aerogenes*: этот микроорганизм отсутствовал на ЗОС (возможно, в силу наименьшей выборки с данной станции), 2,4% выявлены на КОС, 4,4% — на ЮБОС и максимальные 9,3% — на ЛОС.

Сравнение устойчивости к антибиотикам. Резистентность бактерий к антибиотикам — один из важнейших факторов патогенности бактерий. При анализе генов устойчивости к антибиотикам установлено, что в изолятах *E. coli* из ОС (за вычетом поверхностных вод до и после сброса) они встречаются существенно чаще, чем в кале здоровых людей. В 7,5% изолятов *E. coli* из ОС выявлены гены металл-β-лактамаз, отсутствующие в изолятах из кала. Это различие оказалось статистически достоверным ($\chi^2 = 5,8$; $p = 0,016$). У *Klebsiella* выявлены единичные изоляты как из ОС (по одному для *NDM* и *KPC*), так и из кала (один изолят с *NDM*).

Сравнение репертуара патогенных детерминант. При сравнении репертуара патогенных генов бактерий семейства *Enterobacteriaceae* между изолятами из ОС (за вычетом проб из реки) и кала (рис. 2) установлены некоторые различия. В обоих случаях патогенные детерминанты достоверно чаще встречались в изолятах из ОС. Для *Klebsiella* выявлены достоверные различия только по двум генам, ответственным за адгезию (*mrkD*, $\chi^2 = 4,4$; $p = 0,036$) и транспорт железа (*kfu*, $\chi^2 = 3,9$; $p = 0,048$). У *E. coli* гены *aggR* (регулятор адгезии) и *ipaH* (плазмидный антиген) статистически достоверно чаще выявлялись в изолятах ОС ($\chi^2 = 8,3$, $p < 0,01$; $p = 0,004$). Обнаружены единичные изоляты, несущие гены токсинов — токсин Шига в ОС (*stxI*) и цитонекротический фактор (*CNF1*) в обеих выборках (то есть и в образце кала здорового человека). К сожалению, ПЦР-детекция не позволяет оценить функциональность гена и его экспрессию.

Сравнение по патогенности разных видов *Klebsiella*. На рис. 3 показано соотношение индекса патогенности в двух сравниваемых группах клебсиелл — выделенных из ОС и кала. Индекс патогенности — соотношение количества выявленных патогенных генов к общему числу изолятов данного вида. Нами установлена одинаковая закономерность для обеих выборок. Наиболее высокий индекс отмечен для *K. aerogenensis* (в кале он несколько выше, чем в ОС) и *K. variicola*, а самый низкий характерен для *K. oxytoca*.

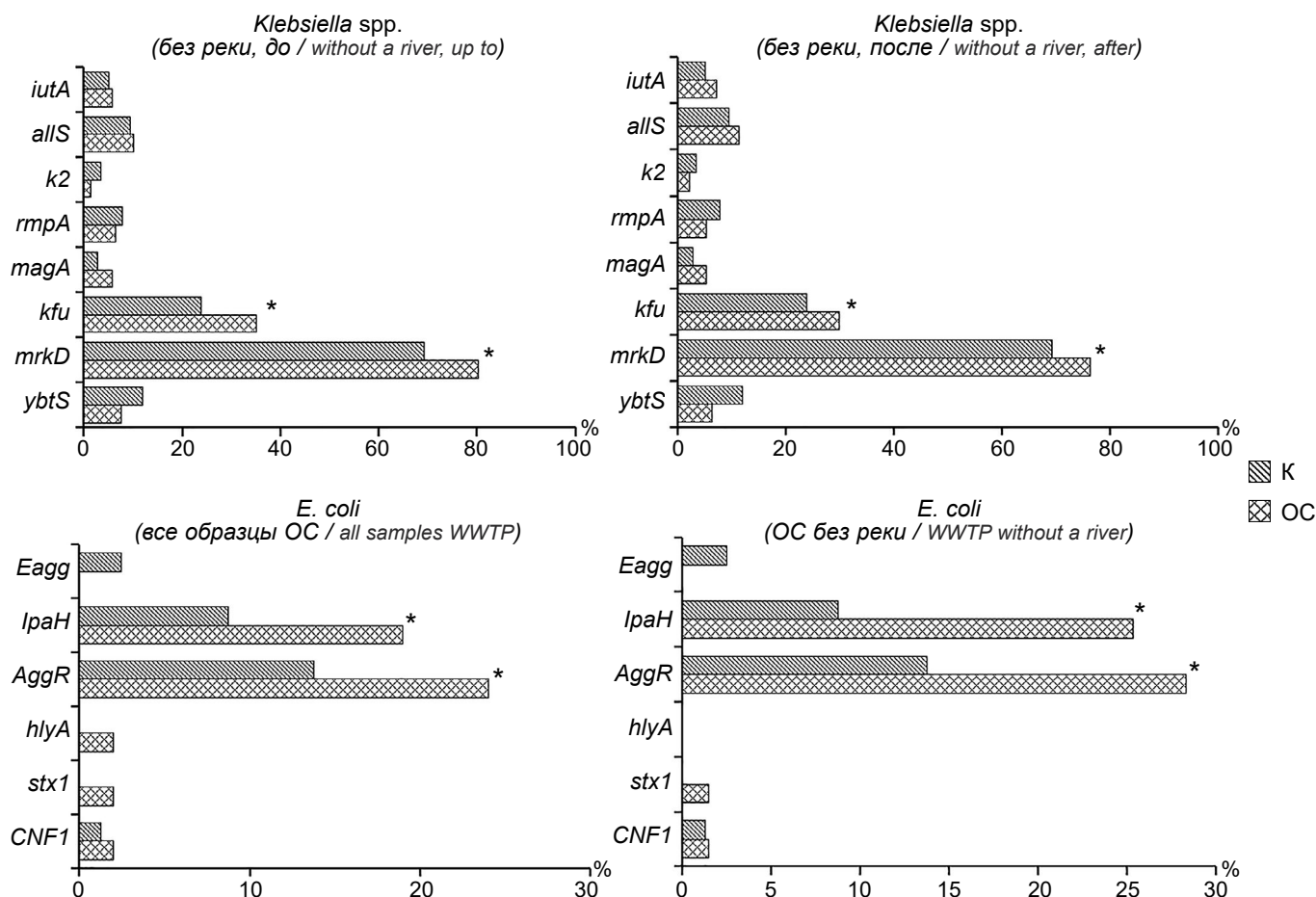


Рис. 2. Различия в репертуаре патогенных генетических детерминант между очистными сооружениями (ОС) и калом здоровых людей (К). Указан процент изолятов данного вида (рода), в которых был выявлен данный ген. * – гены, для которых различия между ОС и К были статистически достоверны.

Fig. 2. Differences in the repertoire of pathogenic genetic determinants between wastewater treatment plants (WWTP) and feces of healthy individuals (F). The percentage of isolates of a given species (genus) in which a given gene was detected is indicated. * – genes for which differences between WWTP and FW were statistically significant.

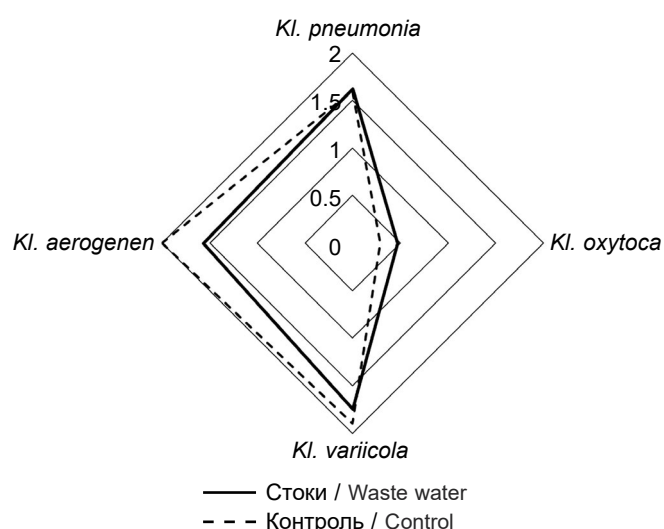


Fig. 3. Изучение индекса патогенности у разных видов *Klebsiella*. Индекс патогенности представляет собой число патогенных генов, выявленных у данного вида, в пересчёте на 1 изолят к общему числу выявленных изолятов данного вида.

Fig. 3. A study of the pathogenicity index in various *Klebsiella* species. The pathogenicity index is the number of pathogenic genes identified in a given species, calculated per isolate relative to the total number of identified isolates of that species.

Распределение патогенного потенциала у бактериальных изолятов семейства Enterobacteriaceae, выделенных из сточных вод, по месяцам. Для оценки влияния погодных условий на обсеменённость образцов из ОС и патогенный потенциал сравнивали процент изолятов с патогенным потенциалом и число патогенных генов в пересчёте на изолят по месяцам (рис. 4). Поскольку для некоторых месяцев число выделенных из проб изолятов было существенно меньше (апрель – для *E. coli*, декабрь – для *Klebsiella* и *E. coli*), сравнение проводили с июня по ноябрь. Для клебсиелл и для облигатных обитателей кишечника *E. coli* количество изолятов являлось максимальным в июне, сентябре и октябре, минимальным – в августе. Максимальный патогенный потенциал обнаружен у клебсиелл, выделенных из проб сточных вод в июне, сентябре и октябре, минимальный – в августе и ноябре. Такие результаты показывают, что основной вклад в остаточное содержание бактериальной микрофлоры в обеззараженных сточных водах, допускаемых в соответствии с нормативами к сбросу в водоёмы, принадлежит бактериям рода *Klebsiella*, обладающим патогенным потенциалом и сохранившим свою жизнеспособность после прохождения этапов очистки.

Сравнение различных очистных сооружений Москвы. Распределение изолятов *E. coli* и *Klebsiella* по ОС Москвы. Образцы сточных вод, отобранные на четырёх очистных сооружениях Москвы, сравнивали по количеству высеянных бактериальных изолятов *E. coli* и *Klebsiella*. Наблюдали значительные различия в зависимости от станции (рис. 5). Наибольшее количество изолятов выделено на ЮБОС,

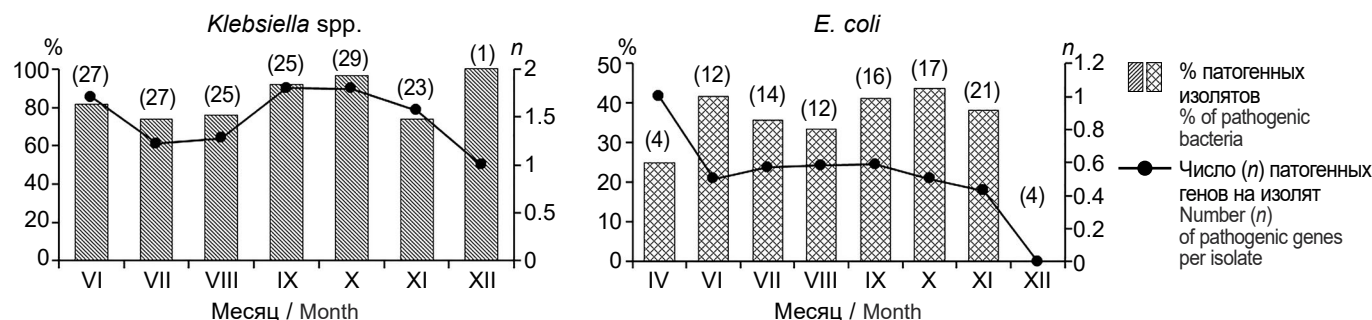


Рис. 4. Процент патогенных изолятов среди выделенных *Klebsiella* spp. и *E. coli* и число патогенных генов на один изолят в зависимости от месяца. В скобках указано общее число изолятов в данный месяц.

Fig. 4. The percentage of pathogenic isolates among *Klebsiella* spp. and *E. coli* isolates and the number of pathogenic genes per isolate depending on the month. The total number of isolates for a given month is given in parentheses.

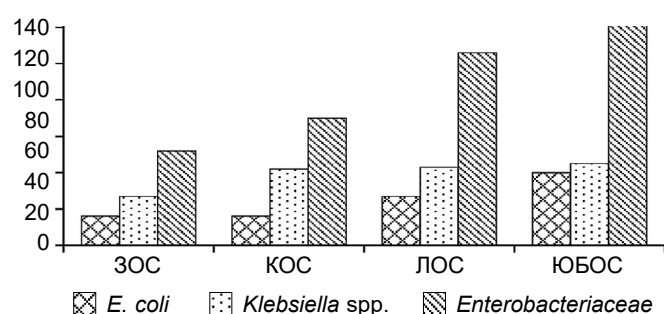


Рис. 5. Количество изолятов *Enterobacteriaceae*, высеянных из образцов сточных вод различных очистных сооружений. Для сравнения приводятся данные по энтерококкам [4].

Fig. 5. Number of *Enterobacteriaceae* isolates isolated from wastewater samples from various treatment plants. Data on Enterococci are provided for comparison [4]. ЗОС – Zelenogradsky wastewater treatment facilities; ЮБОС – Yuzhnoye Butovo wastewater treatment facilities; ЛОС – Lyuberecky wastewater treatment facilities; КОС – Kuryanovsky wastewater treatment facilities.

наименьшее – на ЗОС, у ЛОС при одинаковой производительности с КОС наблюдалось почти вдвое большее количество изолятов *E. coli*.

Распределение патогенного потенциала бактериальных изолятов в зависимости от ОС. Патогенный потенциал *E. coli* и *Klebsiella* на разных станциях отличался (рис. 6). Для *Klebsiella* на всех ОС, кроме ЗОС, он выше, чем такой же показатель у изолятов из кала здоровых людей. При этом удельный вес патогенных изолятов на данной станции из-

менялся незначительно (70–82%), а число патогенных генов в пересчете на изолят изменялось в 1,74 раза. Для *E. coli* параметры, сравнимые с изолятами из кала, продемонстрировала только выборка из КОС. На остальных ОС процент патогенных изолятов и число патогенных генетических детерминант были выше. Максимальное превышение над выборкой из кала выявлено на ЛОС (в два раза).

Что касается репертуара патогенных генетических детерминант, то у *Klebsiella* он мало отличается для разных ОС. На КОС и ЮБОС выявлены все 8 измеряемых патогенных генов *Klebsiella*, на ЛОС – все, кроме *k2*, на ЗОС – только *mrkD*, *kfu*, *magA* и *allS*. Для *E. coli* репертуар патогенных генов на ОС отличается: *aggR* и *ipaH* выявляются на всех ОС, энтеропатогенный патотип – на ЛОС, а *hly* – на ЮБОС. Гены токсинов найдены в изоляте из ЛОС (*stx1*) и ЗОС (в изоляте на входе в ОС одновременно *CNF1* и *stx1*).

Сравнение эффективности на этапах очистки внутри ОС Москвы. Бактериальная обсеменённость образцов на разных этапах очистки внутри ОС. Распределение изученных бактериальных изолятов представителей семейства *Enterobacteriaceae* по точкам отбора (до и после цикла очистки, сбросной канал и окружающие поверхностные воды до и после сброса с ОС) можно рассматривать как показатель эффективности работы цикла очистки сточных вод на данной ОС (рис. 7). В целом наблюдалась сходная картина у всех представителей бактерий семейства *Enterobacteriaceae* (для наглядности данные о *E. coli* и *Klebsiella* представлены в сравнении с *Enterococcus* [4]). Для всех станций количество изолятов на входе в ОС было существенно выше, чем по окончании цикла очистки. Для индикатора фекального загрязнения *E. coli* показано снижение в 2–11 раз, для *Enterococcus* – в 1,6–3 раза. Исключение составили

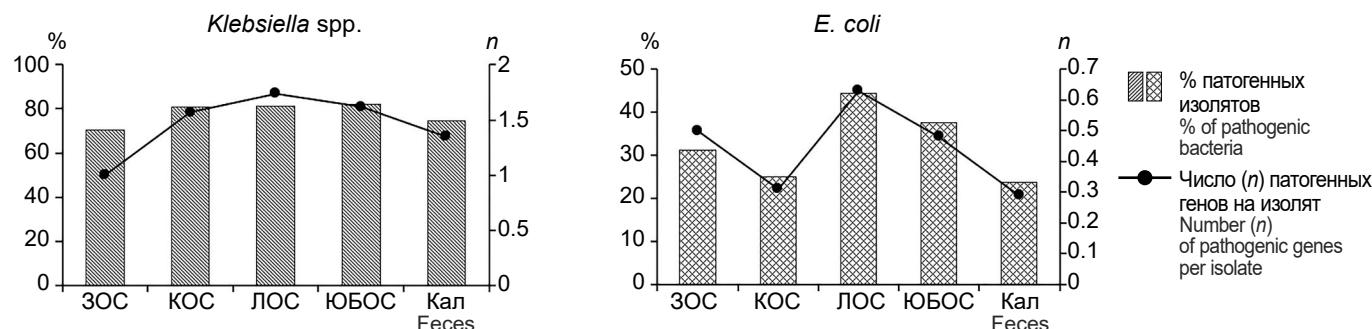


Рис. 6. Патогенный потенциал *Klebsiella* spp. и *E. coli* на различных ОС. Процент патогенных *E. coli* и *Klebsiella* от общего числа изолятов (с данной станции) и число патогенных генов на одну бактерию в зависимости от станции очистки сточных вод в сравнении с патогенным потенциалом кала здоровых людей.

Fig. 6. Pathogenic potential of *Klebsiella* spp. and *E. coli* in different wastewater treatment plants. The percentage of pathogenic *E. coli* and *Klebsiella* from the total number of isolates (from a given wastewater treatment plant) and the number of pathogenic genes per bacterium depending on the wastewater treatment plant compared to the pathogenic potential of healthy individuals' feces. ЗОС – Zelenogradsky wastewater treatment facilities; ЮБОС – Yuzhnoye Butovo wastewater treatment facilities; ЛОС – Lyuberecky wastewater treatment facilities; КОС – Kuryanovsky wastewater treatment facilities.

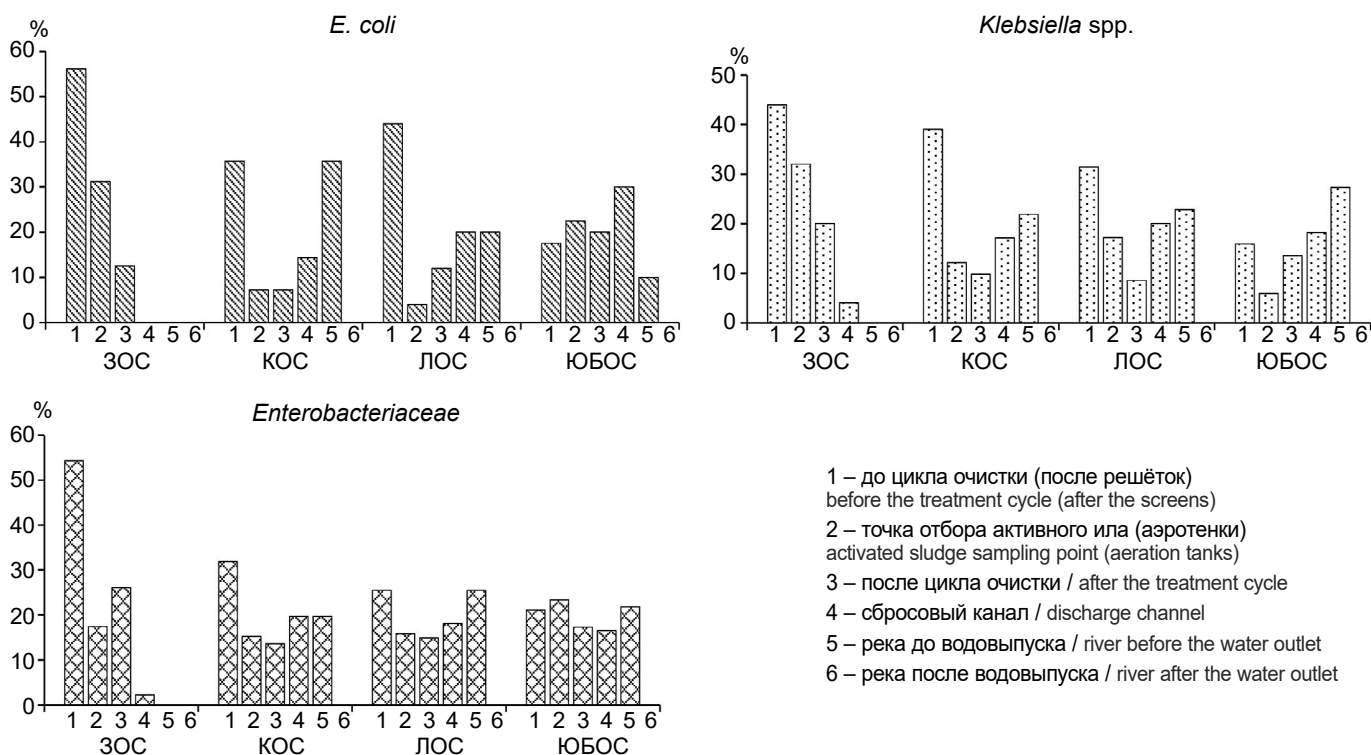


Рис. 7. Распределение изолятов изученных представителей *Enterobacteriaceae* по точкам отбора. Показан процент, который изоляты данной группы, выделенные из данной точки отбора, составляют от всех изолятов данной группы с данного ОС (100%). Точки отбора обозначены цифрами.

Данные о *Enterococcus* проанализированы по [4].

Fig. 7. Distribution of isolates of the studied *Enterobacteriaceae* representatives by sampling points. The shown percentage is isolates of a given group, isolated from a given sampling point, make up of all isolates of a given group from a given treatment facility (100%). Sampling points are indicated by numbers. Data on *Enterococcus* were analyzed by [4].

ЗОС – Zelenogradsky wastewater treatment facilities; ЮБОС – Yuzhnoye Butovo wastewater treatment facilities; ЛОС – Lyuberecky wastewater treatment facilities; КОС – Kuryanovsky wastewater treatment facilities.

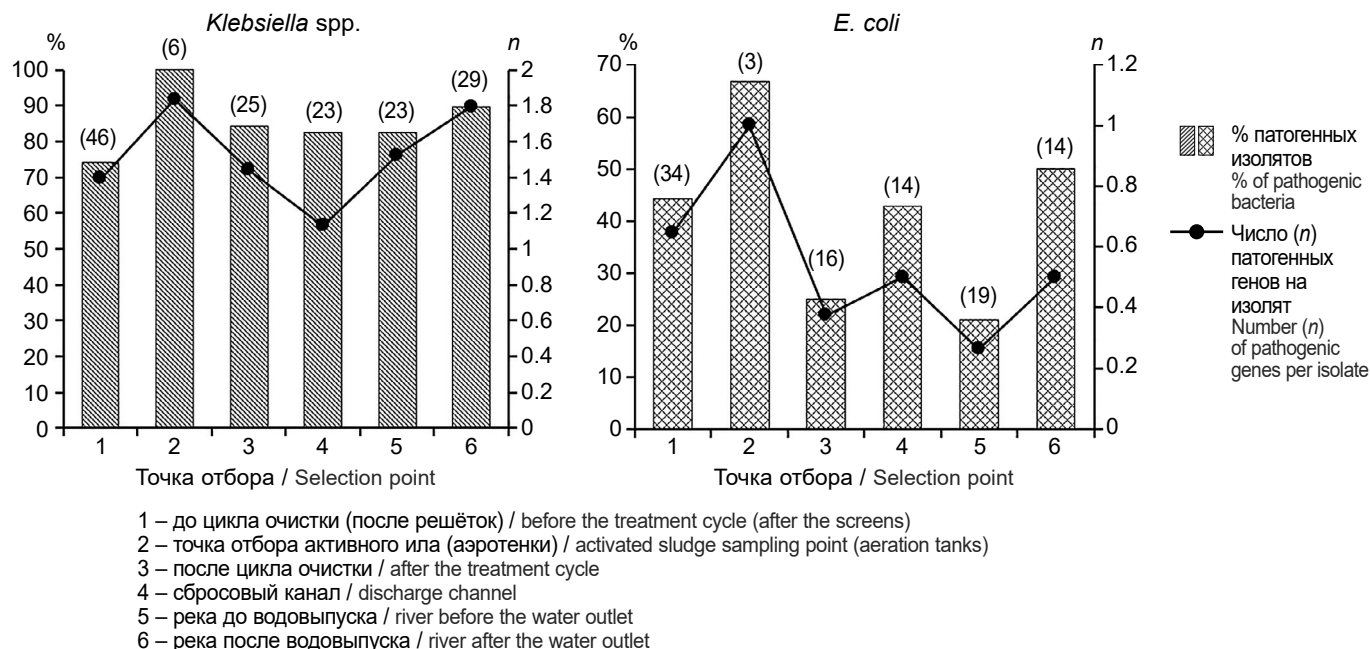


Рис. 8. Патогенный потенциал *Klebsiella* spp. и *E. coli* на разных точках отбора образцов. Процент изолятов, содержащих патогенные гены, от общего числа изолятов для каждой точки отбора и число патогенных генов на одну бактерию в зависимости от точки отбора. В скобках указано общее число изолятов в данной категории.

Fig. 8. Pathogenic potential of *Klebsiella* spp. and *E. coli* at different sampling points. Percentage of isolates containing pathogenic genes from the total number of isolates for each sampling point and the number of pathogenic genes per bacterium depending on the sampling point. The total number of isolates in a given category is given in parentheses.

ЮБОС, где после цикла очистки слегка уменьшалось количество изолятов клебсиелл и *Enterococcus*, а количество изолятов *E. coli* несколько возрастало. Данные ЗОС демонстрируют наибольшую чистоту водного объекта — приёмника сточных вод. Практически не высевались *Enterobacteriaceae* из реки до и после водовыпуска. Сбросовый канал в ЛОС и КОС демонстрирует меньшее загрязнение, чем окружающие воды. Различия в распределении изолятов клебсиелл между станциями оказались достоверными ($\chi^2 = 26,2$ ($p < 0,05$; $p = 0,05$)) и для энтерококков $\chi^2 = 44,4$ ($p < 0,01$; $p = 0,01$), и для *E. coli* ($\chi^2 = 28,1$ ($p < 0,05$; $p = 0,05$)).

Патогенный потенциал изолятов в различных точках отбора образцов (на разных этапах очистки). Помимо обсеменённости образцов на разных этапах очистки сточных вод оценивали распределение патогенного потенциала изолятов (рис. 8). Сравнение точек 1 и 3 (на входе и по окончании цикла очистки) позволяет сделать предположения о влиянии цикла очистки на патогенный потенциал бактерий. Для клебсиелл после цикла очистки он даже несколько выше, чем на входе. Напротив, для изолятов *E. coli* оба показателя патогенного потенциала после цикла очистки снижаются вдвое. Как у клебсиелл, так и у *E. coli* максимальный процент патогенных изолятов (а для *E. coli* и число патогенных генов в пересчёте на 1 изолят) выявляется в образцах из активного ила. При этом число изолятов, выделенных с этой точки отбора (как и число отборов проб), было значительно меньше, чем с других, так что сравнение нужно проводить с осторожностью.

Репертуар патогенных генов *Klebsiella* сходен у изолятов из разных точек отбора с единственным отличием: ген патогенного серотипа k2 выявлен только на входе в ОС (данные не показаны). Для *E. coli* картина была следующей: *agg* идентифицирован на всех точках отбора; *ipaH* и бета-лактамазы — на всех, кроме поверхностных вод выше сброса с ОС; токсины и энтеропатогенные патотипы — на входе и в сбросовом канале или поверхностных водах выше сброса.

Если сравнивать выборки изолятов семейства *Enterobacteriaceae* из сточных вод и кала, то для всех изученных представителей ОС-группа демонстрировала больший процент патогенных изолятов (40 и 26% — для *E. coli*, 85 и 74% — для клебсиелл, 43 и 40% — для энтерококков) и большее число патогенных генов в пересчёте на изолят (0,66 и 0,33 — для *E. coli*, 1,5 и 1,35 — для клебсиелл, 0,68 — для обеих групп энтерококков). Наиболее выражена разница для *E. coli* (1,5–2 раза), а минимальна — для бактерий рода *Enterococcus*. Однако для всех представителей следует учитывать, что эта разница обеспечивается за счёт изолятов, отобранных на входе в ОС (14% — для *E. coli*, 21% — для клебсиелл, 12% — для энтерококков). Это вполне ожидаемый результат, поскольку в сточные воды попадают фекальные микроорганизмы не только от здоровых, но и от больных людей.

Обсуждение

Сопоставляя данные настоящей работы с предыдущей публикацией [3], в которой представлен анализ патогенного потенциала изолятов энтерококков, выделенных из сточных вод, можно составить общую картину распространённости и патогенного потенциала бактериальных изолятов, выделенных из ОС Москвы (группа изолятов ОС). В качестве контрольной группы изолятов с безопасным для человека уровнем патогенного потенциала выбраны изоляты из кала людей без кишечных расстройств. При сравнении этих групп выявлены значимые различия. Первое заключается в видовом разнообразии двух изученных родов — *Klebsiella* и *Enterococcus*. *K. oxytoca* в два раза реже выявляется в сточных водах по сравнению с контрольной группой, причём этот вид оказался наименее патогенным по количеству обнаруженных патогенных генов на изолят. *E. hirae* широко представлен в сточной воде (24,2%), а в микробиоме здоровых лиц он выявлялся в 1,2% [3].

Некоторая разница выявлена и в патогенном потенциале исследованных групп. Значимое отличие ОС-изолятов *Klebsiella* — более частое выявление генов *kfu* и *mrkD*. Это подтверждает результат, полученный нами ранее на малой выборке изолятов из сточных вод для *mrkD* и из поверхностных и сточных вод для *kfu* [18]. Только среди энтерококков из ОС выявлялся ген *Hyl* [3].

Значимую разницу в наличии генов устойчивости к антибиотикам между группами ОС и К показали лишь изоляты *E. coli*: β -лактамазы выявлены только в изолятах, выделенных из сточных вод (в том числе и поверхностных вод вблизи, но вне очистных сооружений). Аналогичные результаты, показывающие высокую эффективность работы очистных сооружений коммунальных сточных вод Москвы в отношении бактериальных изолятов, обладающих генами антибиотикорезистентности, получены Ш.А. Бегматовым и соавт. [17].

Общие повышенные значения показателей патогенности у ОС выборки обеспечивались показателями изолятов, отобранных на входе в ОС. Действительно, в неочищенных сточных водах вполне ожидаемо можно обнаружить изоляты от нездоровых людей, в том числе потенциально патогенные.

По нашим наблюдениям, показатели обсеменённости и наличие патогенного потенциала у изолятов различаются от месяца к месяцу. При этом характер изменений у разных представителей семейства *Enterobacteriaceae* отличается. Если у клебсиелл и *E. coli* количество изолятов было максимальным в июне, сентябре и октябре (за исключением уменьшения в декабре, общего для всех трёх изученных родов бактерий), то у энтерококков [3] это число существенно возрастало в июле и ноябре, а минимум для всех изолятов приходился на август. Изменение патогенного потенциала происходило синхронно у *E. coli* и клебсиелл (минимум в августе), у энтерококков же повышение происходило в июне, июле и ноябре. Доля патогенных изолятов увеличивалась в июле, августе и сентябре. Сравнить показатели за декабрь не представляется возможным в силу очень малой выборки. Таким образом, остаётся неясной связь в колебаниях показателей от месяца к месяцу с погодными условиями и способностью бактерий к размножению в окружающей среде.

Наличие патогенного потенциала у выделенных из сточных вод представителей семейства *Enterobacteriaceae* и количество жизнеспособных бактерий использованы нами для сравнительной характеристики работы станций. Выявлены различия между ОС по количеству жизнеспособных бактерий в исследуемых образцах. Так, несмотря на меньшую пропускную производительность по сравнению с другими станциями, наибольшее количество изолятов обнаружено на станции ЮБОС, а наименьшее — на ЗОС. Мажорным микроорганизмом на всех ОС был энтерококк, далее с отставанием в 2–3 раза обнаружены примерно в одинаковых количествах на всех ОС, кроме ЗОС (вдвое меньше), бактерии рода *Klebsiella*. Бактерии *E. coli* выявлены в наименьших количествах, при этом на ЮБОС количество жизнеспособных бактерий *E. coli* соответствовало количеству представителей бактерий рода *Klebsiella*. Наиболее высокий патогенный потенциал изолятов *E. coli* наблюдался на станции ЛОС.

Максимальное количество микроорганизмов выявлено на точке входа в ОС, а максимальный патогенный потенциал изолятов — в активном иле. Если рассматривать снижение количества жизнеспособных бактерий в сточной воде на этапах очистки между входом и выходом как показатель эффективности работы станции, например, для *E. coli*, то наиболее эффективной выглядит работа ЛОС (падение в 11 раз), а наименее эффективной — ЮБОС (рост в 1,28 раза). Интересно, что наименьшее число изолятов для всех *Enterobacteriaceae* выявлено на ЗОС и в окружающих эту станцию поверхностных водах (р. Сходня). К сожалению, не всегда снижение бактериального загрязнения в процессе очистки отражается на чистоте окружающих станцию по-

верхностных вод (КОС и ЛОС). В нашей работе отмечено некоторое повышение бактериального загрязнения в точке «ниже 500 м по течению реки после сброса обеззараженных сточных вод» по сравнению с точкой «сбросной канал», что косвенно свидетельствует о санитарно-микробиологическом неблагополучии рек бассейна р. Москвы: р. Пехорка (ЛОС), р. Москва (КОС) и особенно р. Чечёра (ЮБОС).

Установлено, что в результате работы ОС происходит снижение в сточных водах количества жизнеспособных бактерий представителей семейства *Enterobacteriaceae* (для всех станций, кроме ЮБОС), но на патогенном потенциале это не сказывается (см. рис. 8).

Полученные данные вполне согласуются с Государственным докладом Роспотребнадзора «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в городе Москве в 2021 году» [23].

Обобщая полученные данные, можно отметить, что, несмотря на снижение относительных показателей загрязнения в ряде административных округов, интенсивность загрязнения водоёмов Москвы остаётся стабильно высокой. Это связано с продолжающимся нерациональным использованием водных ресурсов, сбросом промышленных и ливневых сточных вод, недостаточно очищенных сточных вод. Наряду с высокими концентрациями взвешенных веществ с начала 2020 г. на стабильно высоком уровне, превышающем гигиенические нормативы, находится микробиологическое загрязнение на водовыпусках Курьяновских и Люберецких очистных сооружений. И уровень загрязнения на Курьяновских очистных сооружениях, оборудованных УФО, и Люберецких (выпуск № 1), не оборудованных УФО, находятся на практически одинаковом уровне: превышение нормативов в сотни и тысячи раз.

Что касается ЮБОС, хотелось бы надеяться, что масштабная реконструкция этой станции с целью увеличения

мощностей приведёт и к повышению эффективности очистки сточных вод.

Ограничения настоящего исследования. При изучении патогенного потенциала изолятов семейства *Enterobacteriaceae* из ОС Москвы и кала людей из I группы здоровья сравнивали выборки изолятов *Klebsiella* (157 СВ и 117 К-изолятов) и *Escherichia coli* (100 СВ и 80 К-изолятов), что представляет собой достаточную референтную выборку. Выборка ограничена по географии, поэтому выводы можно применять к ОС Москвы и Московской области (или сходных географических и экологических условий), где используют сходные схемы очистки.

Заключение

В настоящей работе проведён сравнительный анализ бактериальных изолятов семейства *Enterobacteriaceae*, выделенных из сточных вод Москвы и из кала людей без кишечных расстройств. В результате показано, что изоляты из сточных вод (в том числе недоочищенных) имеют больший патогенный потенциал, чем изоляты, выделенные из кала людей. Установлено, что в результате очистки на очистных сооружениях Москвы (исключение составляют очистные сооружения ЮБОС) снижается уровень бактериального загрязнения сточных вод представителями семейства *Enterobacteriaceae*. Однако у бактерий, сохранивших свою жизнеспособность после этапов очистки, снижения патогенного потенциала не зафиксировано. Основной вклад в остаточное содержание бактериальной микрофлоры в обеззараженных сточных водах, допускаемых в соответствии с санитарным законодательством нашей страны к сбросу в водоёмы после ОС, принадлежит бактериям рода *Klebsiella*, которые не только сохранили свою жизнеспособность после прохождения этапов очистки, но и обладали патогенным потенциалом.

Литература

- Трухина Г.М., Ярославцева М.А., Дмитриева Н.А. Современные тенденции санитарной микробиологии в реализации санитарно-эпидемиологического надзора за безопасностью водных объектов. *Здоровье населения и среда обитания* – 3НУСО. 2022; 30(10): 16–24. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-10-16-24> <https://elibrary.ru/jtlysk>
- Bagley S.T. Habitat association of *Klebsiella* species. *Infect. Control*. 1985; 6(2): 52–8. <https://doi.org/10.1017/S0195941700062603>
- Пай Г.В., Ракитина Д.В., Панькова М.Н., Федец З.Е., Мания Т.Р., Загайнова А.В. Сравнительная оценка патогенного потенциала энтерококков, выделенных от здоровых людей и из сточных вод. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(12): 1272–80. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-12-1272-1280> <https://elibrary.ru/ksnjpx>
- Ёдгорова Н.Т., Бердимуродов Б.П., Ахрарова С.Т. Резистентность к антибиотикам бактерий рода *Klebsiella* встречающихся в открытых водоёмах. *Биология и интегративная медицина*. 2018; (9): 5–16. <https://elibrary.ru/yjiytk>
- Хмелевцова Л.Е., Сазыкин И.С., Селиверстова Е.Ю., Сазыкина М.А., Мирина Е.А. Выявление генов антибиотикорезистентности в сточных водах г. Ростова-на-Дону методом ПЦР-анализа. В кн.: *Экологические проблемы промышленных городов. Сборник научных трудов по материалам 7-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Часть 2*. Саратов; 2015: 219–21. <https://elibrary.ru/xgegir>
- Журавлёв П.В., Панасовцев О.П., Алешня В.В., Казачок И.П., Черногорова Т.Н., Деревякина Е.И. Антибиотикорезистентность бактерий, выделенных из воды открытых водоёмов. *Здоровье населения и среда обитания* – 3НУСО. 2015; (5): 24–6. <https://elibrary.ru/uchpkp>
- Рахманин Ю.А., Иванова Л.В., Артемова Т.З., Гипп Е.К., Загайнова А.В., Максимкина Т.Н. и др. Распространение бактерий рода *Klebsiella* в водных объектах и их значение в возникновении водообусловленных острых кишечных инфекций. *Гигиена и санитария*. 2016; 95(4): 397–406. <https://elibrary.ru/vzvzql>
- Загайнова А.В., Журавлёв П.В., Морозова М.А., Седова Д.А., Грищук О.В., Панькова М.Н. и др. Барьерная роль очистных сооружений в обеззараживании сточных вод в отношении *E. coli*, обобщённых и общих колиформных бактерий. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(5): 479–86. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-479-486> <https://elibrary.ru/nwxqsc>
- Попова А.Ю., Зайцева Н.В., ред. Санитарно-микробиологическая характеристика воды Нижнего Дона как показатель потенциального эпидемического риска. Состояние, тенденции и прогноз. В кн.: *Анализ риска здоровью – 2024. Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Пермь; 2024: 278–91. <https://elibrary.ru/lnvtll>
- Сазыкин И.С., Селиверстова Е.Ю., Хмелевцова Л.Е., Ажогина Т.Н., Кудеевская Е.М., Хаммаи М.И. и др. Гены устойчивости к антибиотикам в сточных водах г. Ростова-на-Дону и нижнем течении р. Дон. *Теоретическая и прикладная экология*. 2019; (4): 76–82. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-4-076-082> <https://elibrary.ru/iepdfd>
- Журавлёв П.В., Алешня В.В., Панасовцев О.П. Ферменты патогенности у бактерий, выделенных из воды открытых водоёмов. *Здоровье населения и среда обитания* – 3НУСО. 2018; (1): 11–4. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2018-298-1-11-14> <https://elibrary.ru/ytzsrz>
- Сергеев В.И., Тряслобова М.А., Кудреватых Е.В., Кузовникова Е.Ж. Частота обнаружения неполомимелитных энтеровирусов в хозяйственно-фекальных стоках, воде и некоторых пищевых продуктах. *Гигиена и санитария*. 2016; 95(6): 525–8. <https://elibrary.ru/whpwhb>
- Анганова Е.В., Савченков М.Ф., Степаненко Л.А., Савилов Е.Д. Микробиологический мониторинг условно-патогенных энтеробактерий в реке Лене. *Гигиена и санитария*. 2016; 95(12): 1124–8. <https://elibrary.ru/xqzrnp>
- Сагдуллаева Б.О., Расулова В.Б., Мирзакаримова М.А. Особенности количественного и качественного микробного состава проб воды реки Сырдарья. *Наука и инновации*. 2023; (2): 1533–8. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8372709>
- Чукалова Н.Н., Кирилук Н.Ю., Шендерюк В.В. Оценка загрязнения российской части Вислинского (Калининградского) залива по микробиологическим показателям. *Известия КГТУ*. 2020; (58): 62–72. <https://elibrary.ru/ouvaah>
- Кольчев Н.М., Петрова М.И., Егорова А.С. Санитарно-микробиологический анализ питьевой воды из разводящей сети децентрализованных водосточников животноводческих ферм Омской области. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2011; (3): 72–5. <https://elibrary.ru/synpro>
- Бергматов Ш.А., Дорофеев А.Г., Пименов Н.В., Марданов А.В., Равин Н.В. Высокая эффективность удаления патогенных микроорганизмов при очистке коммунальных сточных вод города Москвы. *Микробиология*. 2023; 92(5): 521–6. <https://doi.org/10.31857/S0026365623600153> <https://elibrary.ru/bhxilr>
- Paton A.W., Paton J.C. Detection and characterization of Shiga toxinigenic *Escherichia coli* by using multiplex PCR assays for *STX1*, *STX2*, *eaeA*, enterohemorrhagic *E. coli hlyA*, *RFBO111*, and *RFBO157*. *J. Clin. Microbiol.* 1998; 36(2): 598–602. <https://doi.org/10.1128/jcm.36.2.598-602.1998>

19. Pass M.A., Odedra R., Batt R.M. Multiplex PCRs for identification of *Escherichia coli* virulence genes. *J. Clin. Microbiol.* 2000; 38(5): 2001–4. <https://doi.org/10.1128/jcm.38.5.2001-2004.2000>
20. Пай Г.В., Ракитина Д.В., Панькова М.Н., Федец З.Е., Мания Т.Р., Загайнова А.В. и др. ПЦР-анализ присутствия вирулентных генов в изолятах *E. coli* из внешней среды в сравнении с изолятами из кала здоровых и больных воспалительными заболеваниями кишечника людей. *Гигиена и санитария.* 2022; 101(5): 503–10. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-503-510> <https://elibrary.ru/wbacqo>
21. Compain F., Babosan A., Brisse S., Genel N., Audo J., Ailloud F., et al. Multiplex PCR for detection of seven virulence factors and K1/K2 capsular serotypes of *Klebsiella pneumoniae*. *J. Clin. Microbiol.* 2014; 52(12): 4377–80. <https://doi.org/10.1128/jcm.02316-14>
22. Пай Г.В., Ракитина Д.В., Панькова М.Н., Юдин С.М., Загайнова А.В. Сравнение патогенного потенциала изолятов *Klebsiella pneumoniae*, выделенных из кишечной микробиоты человека, из поверхностных и сточных вод. *Гигиена и санитария.* 2020; 99(12): 1360–4. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-12-1360-1364> <https://elibrary.ru/bcaier>
23. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в городе Москве в 2021 году». Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Управление Роспотребнадзора по г. Москве). М.; 2022.

References

1. Trukhina G.M., Iaroslavtseva M.A., Dmitrieva N.A. Current trends in sanitary microbiology within implementation of sanitary and epidemiological surveillance of safety of water bodies. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya – ZNiSO.* 2022; 30(10): 16–24. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-10-16-24> <https://elibrary.ru/jtysk> (in Russian)
2. Bagley S.T. Habitat association of *Klebsiella* species. *Infect. Control* 1985; 6(2): 52–8. <https://doi.org/10.1017/S0195941700062603>
3. Pay G.V., Rakitina D.V., Pankova M.A., Fedets Z.E., Maniya T.R., Zagaynova A.V. Pathogenic potential of enterococcus isolated from healthy people and wastewater. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2023; 102(12): 1272–80. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-12-1272-1280> <https://elibrary.ru/ksnjpx> (in Russian)
4. Yodgorova N.T., Berdimurodov B.P., Ahranova S.T. Antibiotics typical properties of bacteria's *Klebsiella* avlodi changed in the pool. *Biologiya i integrativnaya medicina.* 2018; (9): 5–16. <https://elibrary.ru/yjiytk> (in Russian)
5. Khmelevtsova L.E., Sazykin I.S., Seliverstova Y.Y., Sazykina M.A., Mirina Y.A. Identification of antibiotic resistance genes in the Rostov-on-Don sewage by PCR method. In: *Ecological Problems of Industrial Cities. Collection of Scientific Works Based on the Materials of the 7th All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation. Part 2 [Ekologicheskie problemy promyshlennykh gorodov. Sbornik nauchnykh trudov po materialam 7-i Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Chast' 2].* Saratov; 2015: 219–21. <https://elibrary.ru/xgegir> (in Russian)
6. Zhuravlyov P.V., Panasovets O.P., Aleshnya V.V., Kazachok I.P., Chernogorova T.N., Derevyakina Ye.I. Antibiotic resistance of bacteria isolated from water of the open reservoirs. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya – ZNiSO.* 2015; (5): 24–6. <https://elibrary.ru/uchpkp> (in Russian)
7. Rakhmanin Yu.A., Ivanova L.V., Artemova T.Z., Gipp E.K., Zagaynova A.V., Maksimkina T.N., et al. Distribution of bacteria of the *Klebsiella* strain in water objects and their value in developing of the water caused acute intestinal infections. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2016; 95(4): 397–406. <https://elibrary.ru/vzvzql> (in Russian)
8. Zagaynova A.V., Zhuravlev P.V., Morozova M.A., Sedova D.A., Gritsyuk O.V., Pankova M.N., et al. Barrier role of wastewater treatment in wastewater disinfection with respect to *E. coli*, generalized and total coliform bacteria. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2022; 101(5): 479–86. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-479-486> <https://elibrary.ru/nwxqec> (in Russian)
9. Popova A.Yu., Zaitseva N.V., eds. Sanitary and microbiological characteristics of the Lower Don River water as an indicator of potential epidemic risk. Status, trends, and forecast. In: *Health Risk Analysis – 2024. Materials of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation. In 2 Volumes [Analiz riska zdorov'yu – 2024. Materialy XIV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. V 2-kh tomakh].* Perm'; 2024: 278–91. <https://elibrary.ru/lnvtll> (in Russian)
10. Sazykin I.S., Seliverstova E.Yu., Khmelevtsova L.E., Azhogina T.N., Kudevskaya E.M., Khammami M.I., et al. Occurrence of antibiotic resistance genes in sewages of Rostov-on-Don and Lower Don River. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya.* 2019; (4): 76–82. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-4-076-082> <https://elibrary.ru/iepdfd> (in Russian)
11. Zhuravlyov P.V., Aleshnya V.V., Panasovets O.P. Pathogenicity ferments of bacteria isolated from water of the open reservoirs. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya – ZNiSO.* 2018; (1): 11–4. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2018-298-1-11-14> <https://elibrary.ru/ytzsrj> (in Russian)
12. Sergevnin V.I., Tryasolobova M.A., Kudrevatykh E.V., Kuzovnikova E.Zh. The frequency of detection of non-polio enteroviruses in foul and fecal waste waters, water and some food products. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2016; 95(6): 525–8. <https://elibrary.ru/whpwhb> (in Russian)
13. Anganova E.V., Savchenkov M.F., Stepanenko L.A., Savilov E.D. Microbiological monitoring of opportunistic enterobacteriaceae of the Lena River. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2016; 95(12): 1124–8. <https://elibrary.ru/xqrznp> (in Russian)
14. Sagdullaeva B.O., Rasulova V.B., Mirzakarimova M.A. Features of quantitative and qualitative microbial composition of Syrdarya river water samples. *Nauka i innovatsii.* 2023; (2): 1533–8. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8372709> (in Russian)
15. Chukalova N.N., Kirilyuk N.Yu., Shenderyuk V.V. Microbiological assessment of the Vistula (Kaliningrad) lagoon water quality. *Izvestiya KGTU.* 2020; (58): 62–72. <https://elibrary.ru/ouvaah> (in Russian)
16. Kolychev N.M., Petrova M.I., Egorova A.S. The sanitary-microbiological analysis of potable water from the planting network of the decentralized water sources of cattle-breeding farms of the Omsk region. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* 2011; (3): 72–5. <https://elibrary.ru/synpop> (in Russian)
17. Begmatov Sh.A., Dorofeev A.G., Pimenov N.V., Mardanov A.V., Ravin N.V. High efficiency of removal of pathogenic microorganisms at wastewater treatment plants in the city of Moscow. *Mikrobiologiya.* 2023; 92(5): 521–6. <https://doi.org/10.31857/S0026365623600153> <https://elibrary.ru/bhxilr> (in Russian)
18. Paton A.W., Paton J.C. Detection and characterization of Shiga toxigenic *Escherichia coli* by using multiplex PCR assays for *STX1*, *STX2*, *eaeA*, enterohemorrhagic *E. coli hlyA*, *RFB0111*, and *RFB0157*. *J. Clin. Microbiol.* 1998; 36(2): 598–602. <https://doi.org/10.1128/jcm.36.2.598-602.1998>
19. Pass M.A., Odedra R., Batt R.M. Multiplex PCRs for identification of *Escherichia coli* virulence genes. *J. Clin. Microbiol.* 2000; 38(5): 2001–4. <https://doi.org/10.1128/jcm.38.5.2001-2004.2000>
20. Pay G.V., Rakitina D.V., Pankova M.N., Fedets Z.E., Maniya T.R., Zagaynova A.V., et al. PCR analysis of the presence of virulent genes *E. coli* isolates from external environmental in comparison with isolates from feces of healthy people and patients with inflammatory bowel diseases. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2022; 101(5): 503–10. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-503-510> <https://elibrary.ru/wbacqo> (in Russian)
21. Compain F., Babosan A., Brisse S., Genel N., Audo J., Ailloud F., et al. Multiplex PCR for detection of seven virulence factors and K1/K2 capsular serotypes of *Klebsiella pneumoniae*. *J. Clin. Microbiol.* 2014; 52(12): 4377–80. <https://doi.org/10.1128/jcm.02316-14>
22. Pay G.V., Rakitina D.V., Pankova M.N., Yudin S.M., Zagaynova A.V. Comparison of the pathogenic potential of *Klebsiella pneumoniae* isolates from human intestinal microbiota, surface waters, and sewage. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2020; 99(12): 1360–4. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-12-1360-1364> <https://elibrary.ru/bcaier> (in Russian)
23. State Report "On the State of Sanitary and Epidemiological Well-Being of the Population in Moscow in 2021". Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare, Department of Rosпотребнадзор for Moscow). Moscow; 2022. (in Russian)

Сведения об авторах

Пай Галина Васильевна, канд. мед. наук, ст. науч. сотр. лаб. микробиологии и паразитологии ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: gpai@csppfmba.ru

Курбатова Ирина Валентиновна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. микробиологии и паразитологии ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: ikurbatova@csppfmba.ru

Новожилов Константин Андреевич, канд. мед. наук, науч. сотр. лаб. микробиологии и паразитологии ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: KNovozhilov@csppfmba.ru

Мания Тамари Резеовна, науч. сотр. лаб. микробиологии и паразитологии ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: maniya@csppfmba.ru

Загайнова Анжелика Владимировна, канд. биол. наук, зав. лаб. микробиологии и паразитологии ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: azagaynova@csppfmba.ru

Юдин Сергей Михайлович, доктор мед. наук, профессор, Генеральный директор ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: Yudin@csppfmba.ru

Information about the authors

Galina V. Pay, PhD (Medicine), senior researcher, Laboratory of microbiology and parasitology of the Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7086-0899> E-mail: gpai@csppfmba.ru

Original article

Konstantin A. Novozhilov, PhD (Medicine), researcher, Laboratory of microbiology and parasitology of the Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8154-0217> E-mail: KNovozhilov@cspmz.ru

Irina V. Kurbatova, PhD (Biology), senior researcher, Laboratory of Microbiology and Parasitology Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3152-4862> E-mail: ikurbatova@cspfmmba.ru

Tamari R. Mania, researcher, Laboratory of microbiology and parasitology of the Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation; Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, 117198, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6295-661X> E-mail: maniya@cspfmmba.ru

Angelika V. Zagaynova, PhD (Biology), head, Laboratory of microbiology and parasitology of the Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4772-9686> E-mail: azagaynova@cspfmmba.ru

Sergey M., Yudin, DSc (Medicine), professor, general director of the Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7942-8004> E-mail: Yudin@cspfmmba.ru