

АНАЛИЗ СОСТАВА КОММУНАЛЬНЫХ СТОЧНЫХ ВОД ДЛЯ ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ ГОРОДСКОЙ ПОПУЛЯЦИИ¹

© 2023 г. Н. М. Щеголькова^{a, b}, К. Ю. Рыбка^b, М. А. Козлова^{b, *}, С. Л. Харитонов^a

^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

^bИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

* e-mail: mblshok@mail.ru

Поступила в редакцию 29.07.2022 г.

После доработки 29.07.2022 г.

Принята к публикации 31.10.2022 г.

Показана взаимосвязь качества сточных вод и социально-экономических аспектов жизни населения. Коммунально-бытовые сточные воды предлагается использовать для диагностики здоровья населения, оценки пищевых предпочтений горожан, употребления алкоголя, табака, лекарственных и наркотических средств, а также для оценки подверженности населения воздействию вредных для здоровья химических веществ (ПАУ, пестицидов, консервантов, пластификаторов и т. д.) и для своевременного выявления заболеваний (в том числе таких, как COVID-19). Авторы предложили ряд биомаркеров, которые рекомендуется использовать для мониторинга водно-ресурсной системы как составной части урбоэкосистемы.

Ключевые слова: сточные воды, биомаркеры, самоочищение водотоков-приемников сточных вод, диагностика заболеваний, COVID-19, продукты питания, лекарственные средства, здоровье населения.

DOI: 10.31857/S0321059623020141, **EDN:** INKFVV

ВВЕДЕНИЕ

В городах проживает >70% населения мира, при этом люди активно заменяют природную среду техногенной, перестраивают биогеохимические потоки и создают системы и комплексы, перераспределяющие водные и вещественные потоки. Водно-ресурсная система городов становится полностью зависимой от выбранных технологий водоподготовки и водоочистки, а также структуры водопроводно-канализационного хозяйства.

Эффективность биологической очистки стоков напрямую зависит от структуры микробного сообщества очистных сооружений, а качество очищенных сточных вод влияет на экологическое состояние водного объекта, принимающего такие

воды. Употребляемые человеком продукты питания, алкоголь, табак, лекарственные и косметические средства попадают в сточные воды в составе физиологических жидкостей организма в неизменном виде или в форме метаболитов. Кроме того, в сточные воды поступают вирусы и бактерии от носителей инфекции.

Традиционно состав сточной жидкости интересовал специалистов лишь с точки зрения значений ПДК поступающих стоков. Однако сточные воды необходимо рассматривать не только как отход, но и как ценный ресурс (вещественный и информационный). Уже несколько десятилетий в мировой практике существует подход, называемый “эпидемиологией на основе анализа сточных вод” [45], который применяется для оценки потребления различных веществ. В последнее время этот метод также зарекомендовал себя как быстрый и эффективный способ выявления эпидемий и пандемий. Суть подхода заключается в регулярном измерении концентрации биомаркеров определенных веществ, вирусов и бактерий в сточных водах. Пересчет полученных данных проводят на общее число жителей, обслуживаемых данным очистным сооружением. На основе этой информации можно сделать выводы о здо-

¹ Постановка проблемы и разработка методологических подходов выполнены в рамках государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0002 “Исследования геоэкологических процессов в гидрологических системах суши, формирования качества поверхностных и подземных вод, проблем управления водными ресурсами и водопользованием в условиях изменений климата и антропогенных воздействий”), разработка универсальных подходов к биомаркерам выполнена в рамках государственного задания МГУ (тема 122011800459-3 “Почвенные биомаркеры: идентификация, устойчивость, активность, возможность использования для мониторинга”).



Рис. 1. Принципиальная схема эпидемиологического анализа сточных вод [45].

ровые населения по тем или иным показателям (рис. 1).

Цель данной статьи — обобщение имеющихся оценок состояния городской популяции по составу сточной жидкости и расширение этих представлений с учетом имеющихся наработок и анализа состояния сточных и природных вод г. Москвы.

ПРОГНОЗ ЗДОРОВЬЯ ПОПУЛЯЦИИ

Вирусы и бактерии

Оценка здоровья популяции традиционными способами (например, проведение индивидуальных медицинских анализов) связана со значительными временными и экономическими затратами. Диагностика здоровья горожан по составу сточных вод позволяет получить данные быстро, локализовано (по районам) и достаточно точно (так как сточные воды представляют собой усредненный образец для анализа).

Патогенные микроорганизмы попадают в канализационную сеть города в составе физиологических жидкостей, фекалий, а также отмерших клеток кожи и волос. Возможно выявление распространения вирусов посредством анализа сточных вод на присутствие РНК любого патогенного организма в их составе. Такое исследование проведено в США в пик заболеваемости COVID-19 весной 2020 г. [40], когда ежедневно отбирали образцы первичного осадка сточных вод на очистном сооружении, принимающем стоки от 200 тыс. жителей. Сопоставление данных о концентрации вирусной РНК SARS-CoV-2 в осадке и общедоступных данных о заболеваемости (рис. 2) показало, что такой подход позволяет диагностировать

эпидемию на ранних этапах развития (на ≥ 6 дней раньше, чем другие методы), т. е. в досимптомный период, поскольку 44% случаев вторичного заражения COVID-19 происходит именно в это время [24].

В настоящее время программы мониторинга сточных вод на наличие РНК коронавируса уже внедряются в США [12] и европейских странах [14], разработана соответствующая инструментальная база.

Патогенные микроорганизмы появляются в организме зараженного человека задолго до проявления первых симптомов заболевания и остаются в нем в течение некоторого (иногда — достаточно длительного) периода после выздоровления. Так, например, вирус гепатита А присутствует в выделениях человека за 2–3 недели до появления первых симптомов болезни [10]. Время выделения некоторых патогенов приведено в табл. 1.

Мониторинг сточных вод может использоваться и для диагностики других заболеваний, например полиомиелита [31]. В 1961 г. в Йельском университете был проведен эксперимент по оценке эффективности вакцинации от полиомиелита на основе концентрации вируса в сточных водах [42]. В 1977 г. этот метод был применен в Израиле [8], где с 1989 г. функционирует система мониторинга сточных вод на наличие полиовирусов, которая в 2013 г. показала резкий рост концентрации патогенных вирусов в сточных водах и позволила обнаружить их источник и происхождение. Разработанная на основе этих данных математическая модель позволила определить численность заболевших, принять своевременные меры и предотвратить возможную вспышку эпидемии [6, 11].

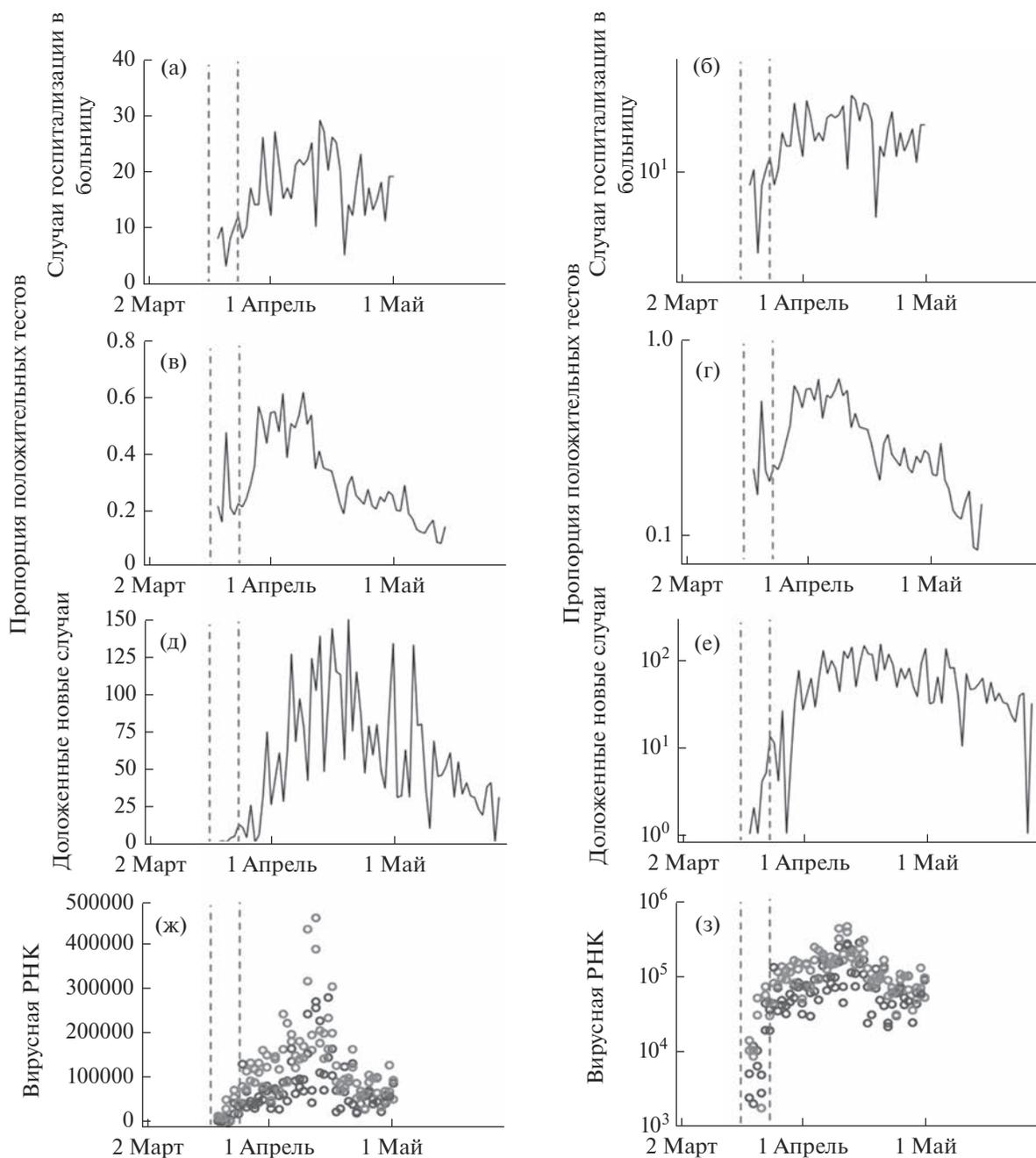


Рис. 2. Количество обращений за медицинской помощью в больницы (а, б), доля положительных результатов тестов на COVID-19 (в, г), количество новых случаев заболевания COVID-19 по данным общедоступной статистики (д, е) и концентрация вирусной РНК в осадке сточных вод (ж, з). В левом столбце представлены данные по линейной шкале, в правом – по логарифмической [40].

Современные методики позволяют детектировать вирусы в сточных водах с высокой точностью. Так, авторы исследования, проведенного в Хельсинки [27], утверждают, что способны выявить вирус полиомиелита среди 700 тыс. человек, проанализировав всего один образец (400 мл) сточной воды, при условии, что вирус хотя бы от семидесяти зараженных попал в канализационную сеть; т. е. метод становится эффективным

при 0.01% заболевших от общей численности жителей. В 2003 г. ВОЗ выпустила руководство по мониторингу содержания вируса полиомиелита в сточных водах с целью контроля распространения инфекции на глобальном уровне [23].

Среди других заболеваний, идентификация которых может быть проведена посредством мониторинга сточных вод, – гепатит А и Е, гастро-

Таблица 1. Концентрация некоторых патогенных микроорганизмов в сточных водах и продолжительность их поступления в стоки с момента заражения [46]

Микроорганизм	Среда	Концентрация*	Продолжительность
<i>C. botulinum</i>	Фекалии	10^8	Нет данных
<i>C. psittaci</i>	Фекалии	10^2-10^3	28 дней**
<i>B. abortus</i>	Моча	10^2-10^6	8–12 недель
<i>Japanese encephalitis</i>	Моча	1–4	3 дня
<i>Enteroviruses</i>	Фекалии	10^8-10^{12}	От недель до месяцев
<i>Protozoa</i>	Фекалии	10^6-10^7	От недель до месяцев
<i>C. burnetii</i>	Фекалии	10^3-10^4	7 дней
<i>Influenza</i>	Назальный образец	10^5-10^7	От 5 дней до недель

* На миллилитр объема или грамм твердого вещества.

** Животные.

энтерит, брюшной тиф, холера, норовирусная, ротавирусная, калицивирусная, энтеровирусная инфекции и другие заболевания, вызываемые вирусами и бактериями [26, 32]. Анализ сточных вод на наличие норовирусов, вызывающих гастроэнтерит, проводился в Италии [34], где проанализировали сточные воды с 32-х очистных сооружений (307 образцов) и выявили наличие заболевания.

Образцы для анализа на наличие вирусов отбирают из сточных вод различной степени очистки; кроме того, вирусная РНК в значительном количестве содержится и в осадке сточных вод [15].

Важно отметить, что подобный подход позволяет идентифицировать патогенные микроорганизмы в том числе в организмах здоровых носителей. Так, в случае энтеровирусов и бактерий лишь ~50% носителей заболевают, а остальные – пассивные переносчики [18].

Лекарственные средства

Анализ сточных вод на наличие компонентов тех или иных лекарственных средств представляет интерес как косвенный показатель болезней, которыми страдает население, а также как индикатор применения запрещенных лекарственных препаратов.

Основная сложность при этом – выбор биомаркеров, так как лекарственные вещества в зависимости от коэффициентов сорбции, кинетики превращения и периода полураспада попадают в сточные воды не только в неизменном виде, а также в виде множества метаболитов. Концентрации таких соединений обычно ≤ 1 мкг/л, находятся в диапазоне в среднем 10–100 нг/л. В процессе очистки сточных вод и даже во время дви-

жения по канализационной сети эти вещества могут значительно трансформироваться, что усложняет процесс их детектирования (так происходит, например, с парацетамолом). Стабильность биомаркеров лекарственных препаратов изучена недостаточно, и хотя такие исследования существуют [17], интерполировать их результаты не всегда представляется возможным. Кроме того, не все метаболиты специфичны по отношению к своему исходному препарату.

Поступление лекарств в бытовые сточные воды зависит от степени их метаболизации в организме человека и животных при естественном выделении, она варьирует в широком диапазоне. Например, более высокие показатели экскреции антибиотиков в неизменной форме присущи амоксициллину и тетрациклину (до 90%), а более низкие – эритромицину (12–15), сульфаметоксазолу (до 30) и кларитромицину (25%) [2, 33].

Помимо данных о применении тех или иных препаратов, можно проследить сезонную динамику их использования. Так, в [20] показано, что пик потребления антибиотиков, антидепрессантов, антигистаминных препаратов и регуляторов липидного обмена приходится на зимний период для регионов, имеющих выраженные сезонные колебания температуры.

Работа по появлению препарата от гриппа “Тамифлю” (“Tamiflu”, действующее вещество – осельтамивир карбоксилата) во время вспышки гриппа проведена в Японии, на которую приходится >70% его мирового потребления [35].

На рис. 3 показано изменение концентрации осельтамивир карбоксилата в семи реках Японии в период с июля 2010 г. по июнь 2011 г., зафиксировано резкое увеличение концентрации определяемого вещества в период вспышки гриппа – с

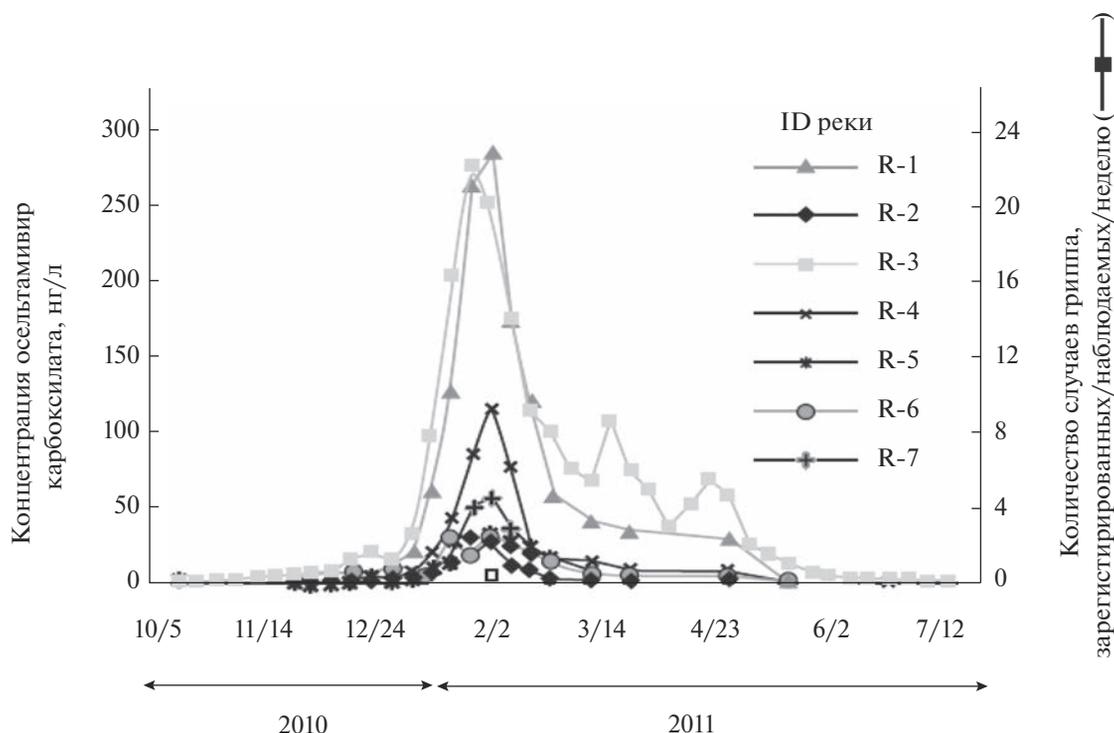


Рис. 3. Динамика изменения концентрации осельтамивир карбоксилата [35].

января по март 2011 г. в пробах речной и сточной воды.

Исследования авторов настоящей статьи, проведенные в 2019–2020 гг. в зонах сброса сточных вод городов Московской области, показали заметно более высокие концентрации напроксена и офлоксацина в зимний период, чем в летний, т. е. в эпидемиологически неблагоприятный период. Кроме того, только в зимний период обнаружены антибиотики триметоприм и эритромицин в максимальных концентрациях — 68 и 70 нг/л соответственно (табл. 2) [2].

Австралийские ученые выявили положительную корреляцию между применением антидепрессантов (как показателя психического здоровья населения) и родом занятий населения (максимальная положительная корреляция характерна для неквалифицированных работников), уровнем дохода и образования, семейным положением и доступом к Интернет, а вот корреляция с возрастом не была обнаружена [46].

Также проанализировано содержание нестероидных противовоспалительных препаратов (ибупрофен и напроксен) в сточных водах. Для напроксена, который применяется при хронической боли, найдена корреляция с возрастом изученного городского населения (так как хронические заболевания, как правило, с возрастом прогрессируют), в то время как для ибупрофена, который используют для острой непродолжитель-

ной боли, корреляция с возрастом не обнаружена. А вот в случае с гипотензивными средствами (понижающими давление — атенололом и гидрохлоротиазидом) наблюдалась корреляция и с возрастом, и с социальной неблагополучностью [46].

Антигистаминные препараты (например, фексофенадин и цетиризин) могут служить маркерами аллергических реакций. Кроме того, употребление этих препаратов тесно связано с экологической ситуацией в городах и такими аллергенами, как пыльца, пыль, плесень и сырость [46].

Помимо анализа индивидуальных соединений, не меньший интерес с эпидемиологической точки зрения представляет соотношение двух и более различных биомаркеров. Так, например, высокое содержание в сточных водах антигистаминных препаратов и котинина (биомаркер табака) может свидетельствовать о большей подверженности курильщиков астме [28].

Продукты питания и обеспеченность ими жителей

О взаимосвязи состава сточных вод и питания городского населения писал еще С.Н. Строганов [3]. Проанализировав качество сточных вод городских московских очистных сооружений во время трех периодов в начале XX в., сильно различающихся по социально-политической обстановке (довоенный, военный и революционный), ученый выделил статистически значимое различие

Таблица 2. Результаты определения напроксена, офлоксацина, триметоприма и эритромицина в 2016, 2019 и 2020 гг. (С. – сентябрь, Ф. – февраль, А. – август; прочерк – не обнаружено или концентрация ниже предела обнаружения (офлоксацин <1, сульфаметоксазол <0.5, триметоприм <0.5, эритромицин <1; н.п. – в указанном месте отбор проб не проводился)

Место и дата обнаружения			Канал Старая Яхрома, зона сброса очищенных сточных вод г. Дмитрова	Северная канавка, зона сброса очищенных сточных вод г. Дубны	руч. Перемерки (впадение в р. Волгу), зона сброса очищенных сточных вод г. Твери	р. Истра, зона сброса очищенных сточных вод г. Истры	р. Москва, зона сброса очищенных сточных вод г. Звенигорода
Концентрация, нг/л	Напроксен	С.2016	9.60 ± 4.70	3.60 ± 2.52	–	–	н.п.
		Ф.2019	298	н.п.	2.10 ± 1.47	–	29 ± 9.3
		А.2019	31 ± 9.9	–	–	–	–
		Ф.2020	754	73 ± 23.4	–	–	64 ± 20.5
	Офлоксацин	С.2016	11.6 ± 6.4	1.70 ± 1.17	7.20 ± 3.96	–	н.п.
		Ф.2019	–	н.п.	245 ± 135	81.0 ± 44.6	480 ± 264
		А.2019	–	–	–	–	32 ± 17.6
		Ф.2020	366 ± 201	–	36.0 ± 19.8	68.0 ± 37.4	506
	Триметоприм	С.2016	–	–	–	–	н.п.
		Ф.2019	–	н.п.	22.0 ± 7.9	–	68.0 ± 24.5
		А.2019	–	–	–	–	–
		Ф.2020	–	–	–	–	–
	Эритромицин	С.2016	–	–	–	–	н.п.
		Ф.2019	–	н.п.	–	–	70.0 ± 34.3
		А.2019	–	–	–	–	–
		Ф.2020	–	–	–	–	–

между содержанием белкового и аммонийного азота в стоках, показав, что состав сточных вод напрямую зависит от качества питания населения. В этой же работе С.Н. Строганов первым из российских и, с высокой вероятностью, зарубежных ученых (аналогичных зарубежных работ авторам данной статьи найти не удалось) сформулировал тезис о том, что коммунальная водная система города должна рассматриваться как единая система (“единый организм”), где очистные сооружения коммунально-бытовых стоков играют наиважнейшую роль.

Н.М. Щеголькова, продолжив исследования С.Н. Строганова для Москвы, подтвердила его наблюдения и продемонстрировала, что в период “перестройки” в России качество питания жителей напрямую отразилось не только на качестве сточных вод, но и на экологическом состоянии р. Москвы [4]. На основе анализа данных по составу воды р. Москвы и составу сточных вод очистных сооружений показано, что в период

1995–2005 гг. р. Москва имела максимальный потенциал самоочищения по азоту и органическому веществу. В этот период на участке реки ниже выпусков московских очистных сооружений удалялось в среднем 80% азота от общего его поступления, тогда как в другие периоды (до и после названного) удалялось ≤40%.

Эффект резкого возрастания процессов самоочищения в реке был следствием “самопроизвольного” запуска процессов нитри-денитрификации на очистных сооружениях. Причиной этого “запуска” микробиологических процессов послужила комбинация факторов, связанных с происходящими в то время социальными преобразованиями в стране и городе (снижение водопотребления, уменьшение белкового питания населения, уменьшение токсичности стоков) [4].

Количество и качество потребляемой жителями пищи могут быть оценены по ряду биомаркеров. Например, количество потребляемой пищи растительного происхождения – по содержанию

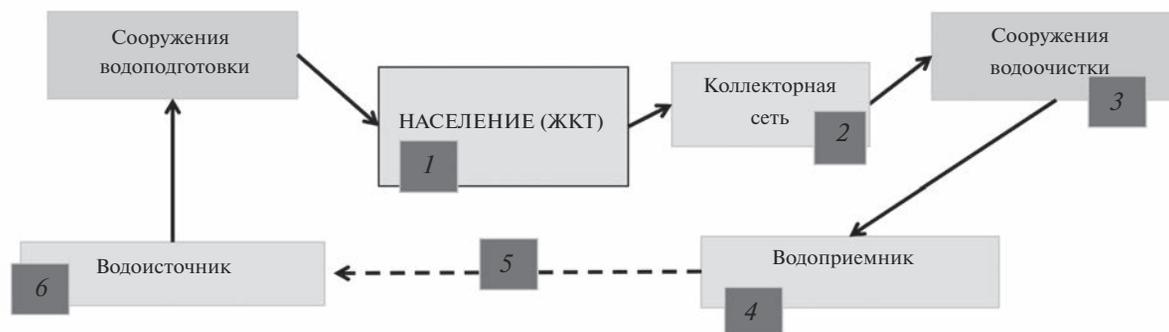


Рис. 4. Общая структура водной системы мегаполиса. В серых квадратах цифрами отмечены места селекции бактериальных сообществ [5].

фитоэстрогенов (даидзеин, генистеин, энтеролактон), которые содержатся в растительной пище и бакалейных продуктах – фруктах, овощах и злаках. При этом даидзеин и генистеин содержатся преимущественно в соевых продуктах питания, а энтеролактон – в цельнозерновых и бобовых, фруктах и овощах. Этим можно объяснить значительное различие концентраций генистеина в выделениях азиатов и европейцев – первые употребляют на порядок больше соевых продуктов [50].

Биомаркерами для мониторинга потребления продуктов животного происхождения служат креатинин, таурин, метилгистидин, ансерин, карнозин, а ацесульфам, сахарин, сукралоза показывают долю искусственных подсластителей в продуктах питания [16].

Как показало исследование, проведенное в Австралии в 2016 г., сточные воды могут служить источником информации не только непосредственно о потребляемых продуктах питания, но и о демографических и экономических аспектах жизни общества [46]. Среди важных индикаторов ученые выделили содержание витаминов, кофеина, пищевых волокон и другие. Эти данные согласуются с результатами социального опроса, согласно которым, люди с более высоким социальным индексом чаще пьют кофе и предпочитают эспрессо или молотый кофе, в то время как слои общества с меньшим благосостоянием пьют растворимый кофе или не употребляют этот напиток вовсе [53].

Биологическое единство водной среды города и структура бактериальных сообществ городской среды

Водоснабжение и водоотведение – базовые части единой системы города. На станциях водоподготовки вода из поверхностных или подземных источников доводится до нормативного ка-

чества, после чего она поступает к потребителям [5] (рис. 4).

После бытового использования стоки поступают в систему канализации. При этом важно отметить, что в некоторых развитых странах “черные” (собственно канализационные) и “серые” (воды душевых и кухонь) стоки канализируются отдельно, а в России и многих других странах осуществляется единое водоотведение.

Каждый этап движения воды (рис. 4) характеризуется специфическим бактериальным сообществом (БС). Наибольшее количество бактерий содержится в бытовых стоках и в активном иле. Бактериоценоз стоков формируется в значительной мере за счет бактериоценоза желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) [38].

В последние годы опубликовано немало статей по метагеному ЖКТ жителей земли. Видовой состав и функционирование БС ЖКТ вызывает повышенный научный интерес, что связано со следующими причинами: влиянием БС ЖКТ на здоровье человека и иммунитет [19, 22, 37]; большим числом бактерий ЖКТ, на порядок превышающим количество клеток человека [41]; варьированием видового состава БС ЖКТ в зависимости от возраста, пола, состояния здоровья, места жительства и питания людей [7, 25, 36, 54, 55].

Канализационные воды, обогащенные бактериями от ЖКТ горожан, далее движутся на очистные сооружения. Чем выше плотность городского населения, тем значимей становится фактор селекции БС активного ила.

Данные многолетнего наблюдения [5] выявили наличие выраженной сезонной динамики количества и видового состава БС поступающих сточных вод в период 1959–1969 гг. и “сглаживание” этой сезонной динамики в период 1999–2003 гг., когда в Москве происходили социальные изменения. Для первого периода достоверно показано, что количество гетеротрофных бактерий, количество колиформных бактерий, а также доля

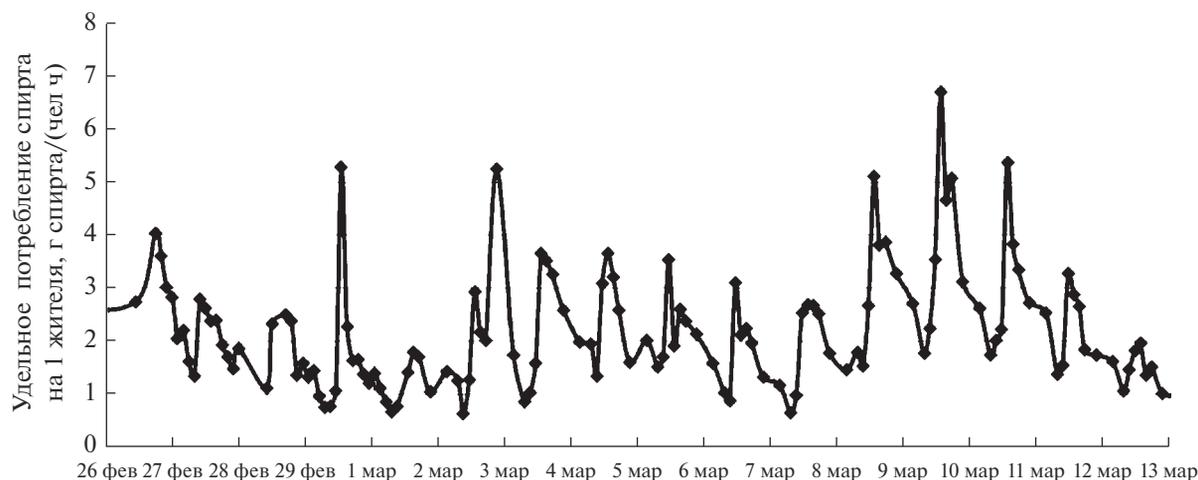


Рис. 5. Динамика удельного потребления спирта на 1 жителя, г/ч [1].

этих бактерий в общем числе микробов в течение года различались в 2–3 раза между летним и зимним периодом.

Выявленная сезонная неоднородность фиксировалась до середины 1990-х гг., после чего летний и зимний периоды практически перестали различаться, а средний уровень поступления гетеротрофных бактерий в сточные воды стал выше. Это объясняется тем, что в “перестроечные” годы нагрузка на очистные сооружения по биокисляемому органическому веществу и азоту сокращалась за счет ухудшения рациона питания жителей аналогично тому, что наблюдал С.Н. Строганов в революционный и военный периоды в начале XX в. [4]. Так, с 1989 по 1999 г. нагрузка на очистные сооружения по органическому веществу и общему азоту уменьшилась на 30%. Кроме того, середина 1990-х гг. была временем изменения быта горожан: менялись моющие препараты, бытовая химия, продукты питания и другие факторы, влияющие на качество поступающей воды. В Москве наличие/отсутствие овощей и фруктов перестало быть сезонным фактором, и одновременно с этим сезонная динамика содержания бактерий в стоках, поступающих на очистные сооружения, сгладилась. Сделанное авторами [5] наблюдение о наличии/отсутствии сезонной динамики в структуре БС сточных вод доказывает тот факт, что если коллекторную сеть города рассматривать как проточный реактор, формирующий состав БС, то можно утверждать, что видовой состав БС до сих пор практически не изучался. При этом выявление закономерностей, аналогичных названым, может способствовать целенаправленной селекции “полезных” микробиологических сообществ уже в коллекторной сети, т. е. еще до поступления сточных вод на очистные сооружения.

Примером незапланированной селекции “полезных” микроорганизмов в канализационной сети города было изменение структуры активного ила в “перестроечные” годы XX в., как указано выше [4]. Важнейшим триггером, запустившим процесс самоочистки от азота в р. Москве в 1995–2005 гг., была селекция бактерий-нитрификаторов в аэротенках очистных сооружений. Их биомасса возросла в несколько раз по сравнению с предшествующим периодом. Поэтому наличие нитрификаторов в биологически очищенных сточных водах, когда расходы сточных вод соизмеримы с расходом реки-водоприемника, также является биомаркером. Показано, что для периодов, когда бактерии-нитрификаторы достоверно присутствовали в сточных водах, доля окисленного азота была $\geq 50\%$ [4]. Однако в случае, когда сточные воды обеззараживаются химическим (хлор и его соединения) или физическим (ультрафиолет, озон) методами, определение этого биомаркера нецелесообразно, так как вместе с патогенными микроорганизмами уничтожаются и полезные. Внедрение в системы мониторинга этого биомаркера целесообразно лишь при осуществлении биологического обеззараживания, когда полезные микроорганизмы не уничтожаются (фотобиореакторы, фито-очистные сооружения).

Алкоголь

Биомаркер употребления алкоголя (этилового спирта) в сточных водах — этилсульфат, концентрация которого в моче пропорциональна выпитому количеству спиртного с учетом незарегистрированных продаж и домашнего производства алкоголя. Такое исследование было проведено в Москве в 2012 г. на Курьяновских очистных сооружениях [1]. Полученные данные свидетельствуют о наличии ярко выраженной суточной и

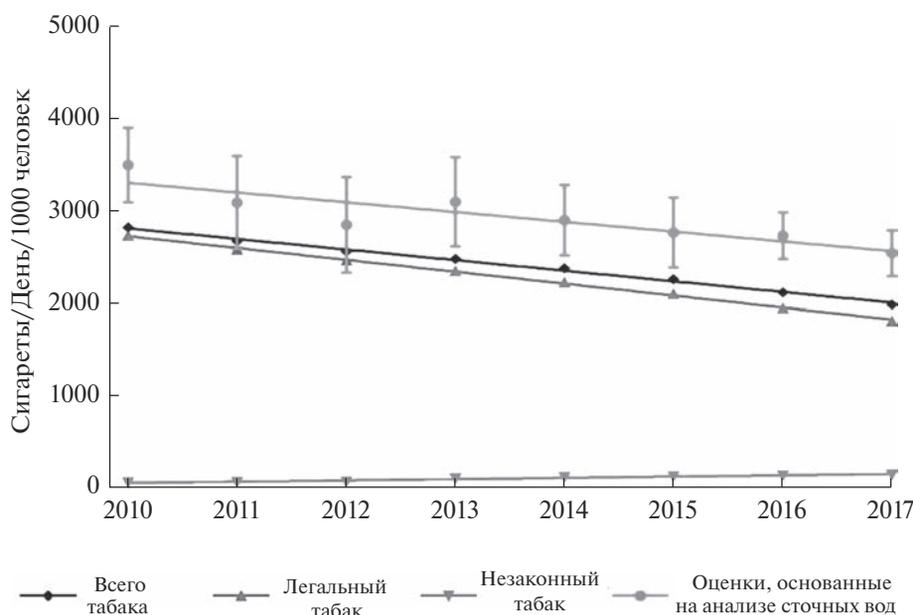


Рис. 6. Потребление табачной продукции (сигарет в день на 1000 жителей) с 2010 по 2017 г. [30].

недельной динамики потребления алкоголя (рис. 5). Минимальные показатели характерны для будних дней, максимальные — для выходных и праздников. При этом среднее потребление составило 52.7 г этилового спирта в сутки на взрослого жителя Москвы.

Табак

Анализ сточных вод используют также для оценки потребления табачной продукции. Австралийские ученые анализировали содержание никотина (биомаркер табака) в сточных водах в течение семи лет (с 2010 по 2017 г.) и на основе этих данных отметили общее снижение потребления табачной продукции на душу населения на 25%, что соответствует данным социальных опросов и статистике продаж (рис. 6) [30].

Наркотические средства

Еще одна сфера применения мониторинга сточных вод — оценка потребления наркотических веществ (как разрешенных, так и запрещенных). При определении удельного потребления этих веществ также делают перерасчет на душу населения, исходя из информации о концентрации химического вещества в сточных водах на очистном сооружении, их объеме и численности населения, обслуживаемого данным очистным сооружением [56].

В 2011 г. в 19-ти европейских городах в течение одной недели проводился мониторинг сточных вод на наличие запрещенных наркотических ве-

ществ (кокаин, амфетамин, экстази, метамфетамин и конопля) [49], в 2015 г. — на алкоголь, кофеин, табак и лекарства [9]. Была оценена степень корреляции этих данных с официальной статистикой продаж. При этом максимальная положительная корреляция обнаружена для лекарственных средств и кокаина. Также была выявлена динамика употребления наркотиков по дням недели с максимумом в выходные дни (рис. 7) [56].

Подверженность населения воздействию опасных веществ

Анализ сточных вод позволяет также оценить санитарно-гигиенические риски и угрозы для здоровья населения от вредных веществ в окружающей среде. Опасные для здоровья токсиканты (ПАУ, фталаты, пластификаторы, дезинфицирующие и моющие средства, пестициды, консерванты и т. д.) попадают в организм человека с пищей, а также при вдыхании и абсорбции кожными покровами (рис. 8). Эти соединения поступают в стоки также и с ливневыми, и с “серыми” водами. Мониторинг сточных вод позволяет определить степень подверженности населения воздействию этих веществ, количество этих веществ в окружающей среде на одного жителя, а также способность вредных веществ к биоаккумуляции и биодegradации. Такой мониторинг позволяет контролировать качество продуктов питания и диагностировать отравления в случае долговременных наблюдений (по изменению трендов и наличию “всплесков” концентраций отдельных веществ).

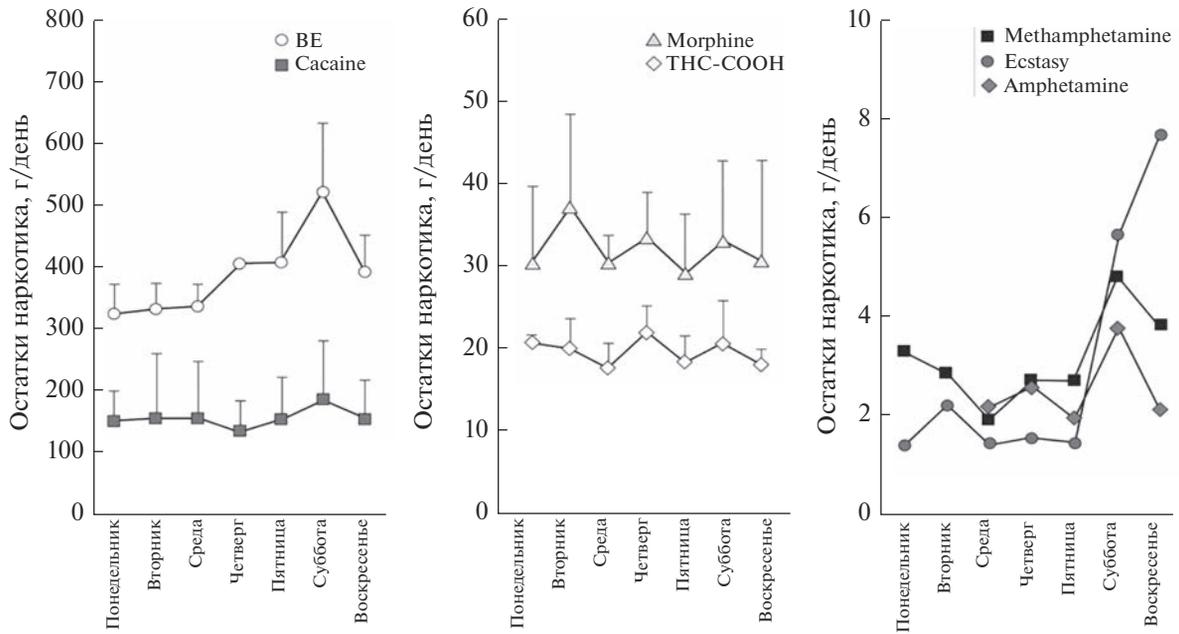


Рис. 7. Употребление наркотических средств (г/день) по данным анализа сточных вод от 1.25 млн жителей Милана [56].



Рис. 8. Миграция и трансформация искусственно синтезированных химических веществ в антропогенной среде [51]. СОСВ – станция очистки сточных вод.

При исследованиях сточных вод проводилась оценка подверженности населения воздействию пестицидов (триазинов, органофосфатов, пиретроидов) [43], пластификаторов (фталатов) [21], ингибиторов горения [39], бензофенона [52], эндокринных деструкторов [29] и других опасных для здоровья веществ.

Согласно результатам работы, проведенной в США, наиболее распространенные группы искусственно синтезированных химических веществ в осадке сточных вод – алкилфенольные ПАВ, фармацевтические препараты и средства

личной гигиены, а также бромированные антипирены [51]. Все они относятся к химическим веществам высокого объема производства, что позволяет сделать вывод об их способности к биоразложению и аккумуляции. Так, гидрофобные вещества, концентрация которых в осадке сточных вод находится в диапазоне долей триллиона (<1 мкг/кг по сухому веществу), следует считать биоразлагаемыми и менее опасными для человека и окружающей среды; а вещества, концентрация которых оценивается в долях миллиона

(>1000 мкг/кг по сухому веществу) – персистентными и способными к биоаккумуляции.

Прогноз социально-экономического благополучия/неблагополучия и здоровья населения

Как отмечено выше, есть тесная взаимосвязь состава сточных вод и социальных, экономических и демографических аспектов жизни населения. На основе анализа сточных вод возможно выделить конкретные химические вещества, которые могут служить маркерами неблагополучия населения и возможного социального кризиса. К таким веществам можно отнести антидепрессанты и сильнодействующие наркотические и лекарственные средства (например, прегабалин, применение которого не по прямому назначению связывают с повышенным риском суицида [44]). В Греции в преддверии социально-экономического кризиса в период с 2010 по 2014 г. было отмечено 10-кратное увеличение потребления населением психотропных средств (как разрешенных, так и запрещенных), в особенности нейролептиков, бензодиазепинов и антидепрессантов, применяющихся в медицине для снижения уровня тревожности и стресса [48]. Таким образом, мониторинг сточных вод способен давать информацию не только о физическом, но и о ментальном здоровье населения, а также о социально-экономической обстановке в стране в целом.

Для оценки здоровья населения можно использовать такой интегральный показатель, как уровень окислительного стресса [13]. Окислительный стресс представляет собой дисбаланс между оксидантами (активными формами кислорода) и антиоксидантной защитой в организме. Молекулы, образующиеся при окислении, могут служить биомаркерами при возрастных или дегенеративных заболеваниях, таких как болезнь Альцгеймера, гипертония, диабет второго типа, несколько видов рака, а также при хронической обструктивной болезни легких, курении и проживании в районах с неблагоприятной экологической обстановкой.

Биомаркерами окислительного стресса в сточных водах может служить 8-гидрокси-2'-дезоксигуанозин (основной продукт окисления ДНК) и 8-гидроксигуанозин, который образуется при окислении РНК. Маркерами процесса окисления белков служат нитротирозин, хлортирозин и бромтирозин, появление которых в биологических жидкостях человека наблюдается при атеросклерозе, болезнях Паркинсона и Альцгеймера, а также других заболеваниях. Дитиозин – специфический маркер окислительного стресса головного мозга [47].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Состав сточной жидкости должен рассматриваться как важный источник информации о состоянии населения. Сточные воды могут служить системой раннего оповещения, позволяющей своевременно диагностировать и, возможно, предотвратить распространение эпидемий и пандемий, оценивать санитарно-гигиенические риски и даже экономические кризисы.

Для внедрения этого подхода в России необходимо:

- 1) разработать соответствующую законодательную базу и стандарты эпидемиологического мониторинга сточных вод;
- 2) выделить приоритетные направления анализа (вирусы, бактерии, химические вещества) и их биомаркеры в сточных водах;
- 3) верифицировать методики определения этих биомаркеров и интерпретации полученных данных.

На основе обширного анализа литературы и эпидемиологических данных предложены следующие показатели здоровья населения и их потенциальные биомаркеры (табл. 3).

Анализ сточных вод рекомендуется применять в дополнение к традиционным эпидемиологическим подходам и верифицировать полученные данные путем сопоставления с клиническими анализами, официальной статистикой заболеваемости и смертности, данными о продаже лекарственных средств, результатами переписи, опросами населения и т. д. При этом подходе необходимо учитывать следующие допущения:

- 1) анализируемые вещества попадают в сточные воды исключительно из организма человека (а не в составе производственных отходов или, например, ливневых сточных вод);
- 2) биомаркеры специфичны по отношению к конкретным анализируемым веществам;
- 3) в процессе движения по канализационной сети биомаркеры стабильны и не подвержены внешнему воздействию (химическому, физическому или биологическому), их концентрация на входе соответствует таковой на выходе (в точке отбора пробы).

Кроме того, необходимо помнить, что таким образом невозможно получить персонализированную информацию. Городские сточные воды представляют собой усредненный по всем видам показатель.

Важный биомаркер для запуска эффективного процесса самоочищения в реке-водоприемнике – наличие бактерий-нитрификаторов в очищенной сточной воде. Этот биомаркер может определяться только в случае отсутствия химического или физического обеззараживания сточных вод.

Таблица 3. Возможные биомаркеры здоровья населения в сточных водах

Показатели здоровья населения		Биомаркеры
Пища (употребление продуктов питания)	Растительная пища	Фитоэстрогены
	Фрукты и овощи	Флавоноиды
	Соя	Изо-флавоноиды
	Цельнозерновые	3(3,5-дигидроксифенил)-1-пропионовая кислота
	Кофе	Кофеин и его метаболиты (1-метилксантин и 7-метилксантин)
	Мясо	Креатинин, таурин, 1-метилгистидин, 3-метилгистидин
	Искусственные подсластители	Ацесульфам, сахарин и сукралоза
Употребление алкоголя		Этилсульфат
Курение табака		Котенин, специфичные для табака нитрозамины, ментол
Применение лекарственных средств	Антибиотики	Цефалексин, сульфаметоксазол, триметоприм, норфлоксацин, левофлоксацин, ципрофлоксацин, азитромицин, эритромицин, кларитромицин, триметоприм, сульфапиридин, сульфаметоксазол, сульфасалазин
	Антидепрессанты, психиатрические лекарства	Циталопрам, десвенлафаксин, венлафаксин, миртазапин, amitриптилин, карбамазепин, оксазепам, мемантин, миртазапин, сертралин
	Антигистаминные препараты	Фексофенадин, меклозин
	Гипотензивные средства	Атенолол
	Регуляторы липидного обмена	Аторвастатин, розувастатин
	Нестероидные противовоспалительные препараты	Ибупрофен, напроксен
	Противосудорожные препараты	Карбамазепин, габапентин, прегабалин
Употребление наркотических средств		Амфетамин, метадон, кодеин, морфин, оксикодон, нороксикодон, трамадол, кокаин, синтетические каннабиноиды, катин, катонин, MDMA
Окислительный стресс		8-гидроксигуанозин, 8-гидрокси-2'-дезоксигуанозин, 3-гидроксипропилмеркаптуровая кислота, дитиروزин, нитротирозин, хлортиروزин, бромтиروزин
Поступление в организм витаминов	Группа В	Рибофлавин, β-пиридинкарбоновая кислота, никотинамид, пантотеновая кислота
	Группа Е	α-карбоксиэтилгидрохроман, γ-карбоксиэтилгидрохроман
Подверженность воздействию опасных для здоровья веществ	ПАУ	Фенантрол
	Солнцезащитные средства	Бензофенон
	Консерванты	Метилпарабен, этилпарабен, пропилпарабен, бутилпарабен
	Дезинфицирующие средства	Триклозан, хлороксиленол, хлорофен
	Антипирены (ингибиторы горения)	Трибутилфосфат, триизобутилфосфат
	Пестициды	3-РВА, <i>trans</i> -DCCA, <i>cis</i> -DCCA, ТСПУ, IMPY
Беременность		Хорионический гонадотропин человека

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов М.Н., Кевбрина М.В., Щеголькова Н.М., Аксенов А.А. Надежный биомаркер: определение потребления алкоголя в Москве по результатам анализа специфических метаболитов в сточной жидкости // Вода Magazine. 2013. № 3 (67). С. 42–46.
2. Козлова М.А., Гальвидис И.А., Буркин М.А. Особенности лекарственного загрязнения водных объектов — источников питьевого водоснабжения Москвы (на примере некоторых антибиотиков) // Метеорология и гидрология. 2020. № 8. С. 87–91.
3. Строганов С.Н. Питание Москвы в 1903–1922 гг. по наблюдениям над сточной жидкостью. М.: Тип. М.К.Х., 1923. 32 с.
4. Щеголькова Н.М., Козлов М.Н., Данилович Д.А., Мойжес О.В. Роль московских очистных сооружений в самоочищении р. Москвы по азоту // Экология и пром-сть России. 2007. № 3. С. 40–43.
5. Щеголькова Н.М., Перцева М.А. Изучение и регулирование водной среды мегаполисов: новые подходы // Вода: химия и экология. 2013. Т. 12. № 12. С. 38–45.
6. Anis E., Kopel E., Singer S.R. et al. Insidious reintroduction of wild poliovirus into Israel // Eurosurveillance. 2013. V. 18. № 38. P. 5.
7. Arumugam M., Harrington E.D., Foerstner K.U. et al. Enterotypes of the human gut microbiome // Nature. 2011. V. 473. № 12. P. 174–80.
8. Badri F., Moshe N. Enterovirus types in Israel sewage // Water Res. 1977. V. 11. № 4. P. 393–396.
9. Baz-Lomba J.A., Salvatore S., Gracia-Lor E. et al. Comparison of pharmaceutical, illicit drug, alcohol, nicotine and caffeine levels in wastewater with sale, seizure and consumption data for 8 European cities // BMC Public Health. 2016. V. 16 (1035). P. 11.
10. Belshe R.B. Textbook of Human Virology. St. Louis: Mosby Year Book, 1991. 1064 p.
11. Brouwer A.F., Eisenberg J.N.S., Pomeroy C.D. et al. Epidemiology of the silent polio outbreak in Rahat, Israel, based on modeling of environmental surveillance data // Proc. National Acad. Sci. 2018. V. 115. № 45. P. E10625–E10633.
12. Centers for Disease Control and Prevention. COVID Data Tracker [Электронный ресурс] // Atlanta, GA: US Department of Health and Human Services, CDC. <https://covid.cdc.gov/covid-data-tracker/index.html#datatracker-home> (дата обращения: 26.07.2022).
13. Choi P.M., Bowes D.A., O'Brien J.W. et al. Do food and stress biomarkers work for wastewater-based epidemiology? A critical evaluation // Sci. Total Environ. 2020. V. 736. 12 p.
14. Commission Recommendation (EU) 2021/472 of 17 March 2021 on a common approach to establish a systematic surveillance of SARS-CoV-2 and its variants in wastewaters in the EU. 2021. 6 p.
15. Corpuz M.V.A., Buonerba A., Vigliotta G. et al. Viruses in wastewater: occurrence, abundance and detection methods // Sci. Total Environ. 2020. V. 745. 26 p.
16. Cuparencu C., Praticó G., Hemeryck L.Y. et al. Biomarkers of meat and seafood intake: an extensive literature review // Genes & Nutrition. 2019. V. 14. № 35. 30 p.
17. Gao J., Li J., Jiang G. et al. Systematic evaluation of biomarker stability in pilot scale sewer pipes // Water Res. 2019. V. 151. P. 447–455.
18. Gibson L.L., Rose J.B., Haas C.N. Use of quantitative microbial risk assessment for evaluation of the benefits of laundry sanitation // Am. J. Infection Control. 1999. V. 27. № 6. P. S34–S39.
19. Gillevet P., Sikaroodi M., Keshavarzian A., Mutlu E. Quantitative assessment of the human gut microbiome using multitag pyrosequencing // Chem. Biodiversity. 2010. V. 7. № 5. P. 1065–1075.
20. Golovko O., Kumar V., Fedorova G. et al. Seasonal changes in antibiotics, antidepressants/psychiatric drugs, antihistamines and lipid regulators in a wastewater treatment plant // Chemosphere. 2014. V. 111. P. 418–426.
21. González-Mariño I., Rodil R., Barrio I. et al. Wastewater-Based Epidemiology as a New Tool for Estimating Population Exposure to Phthalate Plasticizers // Environ. Sci. Technol. 2017. V. 51. № 7. P. 3902–3910.
22. Guarner F., Malagelada J.R. Gut flora in health and disease // Lancet. 2003. V. 360. № 8. P. 512–519.
23. Guidelines for environmental surveillance of poliovirus circulation. WHO. 2003. 19 p.
24. He X., Lau E.H.Y., Wu P. et al. Temporal dynamics in viral shedding and transmissibility of COVID-19 // Nat. Med. 2020. V. 26. P. 672–675.
25. Hehemann J-H., Correc G., Barbeyron T. et al. Transfer of carbohydrate-active enzymes from marine bacteria to Japanese gut microbiota // Nature. 2010. V. 464. P. 908–912.
26. Hellmér M., Paxéus N., Magnius L. et al. Detection of Pathogenic Viruses in Sewage Provided Early Warnings of Hepatitis A Virus and Norovirus Outbreaks // Applied Environ. Microbiol. 2014. V. 80. № 21. P. 6771–6781.
27. Hovi T., Stenvik M., Partanen H., Kangas A. Poliovirus surveillance by examining sewage specimens. Quantitative recovery of virus after introduction into sewerage at remote upstream location // Epidemiol. Infection. 2001. V. 127. № 1. P. 101–106.
28. Ilmarinen P., Tuomisto L.E., Kankaanranta H. Phenotypes, Risk Factors, and Mechanisms of Adult-Onset Asthma // Mediators Inflamm. 2015. V. 2015. 19 p.
29. Kasprzyk-Hordern B., Dinsdale R.M., Guwy A.J. The occurrence of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs in surface water in South Wales, UK // Water Res. 2008. V. 42. № 13. P. 3498–3518.
30. Mackie R.S., Tschärke B.J., O'Brien J.W. et al. Trends in nicotine consumption between 2010 and 2017 in an Australian city using the wastewater-based epidemiology approach // Environ. Int. 2019. V. 125. P. 184–190.
31. Más Lago P., Gary H.E.Jr., Pérez L.S. et al. Poliovirus detection in wastewater and stools following an immunization campaign in Havana, Cuba // Int. J. Epidemiol. 2003. V. 32. № 5. P. 772–777.
32. Metcalf T.G., Melnick J.L., Estes M.K. Environmental Virology: From Detection of Virus in Sewage and Water by Isolation to Identification by Molecular Biology-A

- Trip of Over 50 Years // Annual Rev. Microbiol. 1995. V. 49. № 1. P. 461–487.
33. *Monteiro S.C., Boxall A.B.A.* Occurrence and Fate of Human Pharmaceuticals in the Environment // Rev. Environ. Contamination Toxicol. 2010. V. VIII. P. 53–154.
34. *Muscillo M., Fratini M., Graffeo R. et al.* GIV Noroviruses in Wastewaters and in Stool Specimens from Hospitalized Patients // Food Environ. Virol. 2013. V. 5. P. 194–202.
35. *Nakada N.* Occurrence of Pharmaceuticals & Personal Care Products (PPCPs) in the Aquatic Environment of Asian Countries // Two-Day Workshop “Pharmaceuticals in the Environment – Global occurrence, effects, and options for action”. Geneva, 2014.
36. *Nam Y.-D., Jung M.-J., Roh S.W. et al.* Comparative Analysis of Korean Human Gut Microbiota by Barcoded Pyrosequencing // PLoS One. 2011. V. 6. № 7. 15 p.
37. *Neish A.S.* Microbes in gastrointestinal health and disease // Gastroenterol. 2009. V. 136. P. 65–80.
38. *Newton R. J., McLellan S. L., Dila D.K. et al.* Sewage Reflects the Microbiomes of Human Populations // mBio. 2015. V. 6. № 2. 9 p.
39. *O’Brien J.W., Thai P.K., Brandsma S.H. et al.* Wastewater analysis of Census day samples to investigate per capita input of organophosphorus flame retardants and plasticizers into wastewater // Chemosphere. 2015. V. 138. P. 328–334.
40. *Peccia J., Zulli A., Brackney D.E. et al.* SARS-CoV-2 RNA concentrations in primary municipal sewage sludge as a leading indicator of COVID-19 outbreak dynamics // ResearchGate. 2020. 13 p.
41. *Qin J., Li R., Raes J. et al.* A human gut microbial gene catalogue established by metagenomic sequencing // Nature. 2010. № 4. P. 59–65.
42. *Riordan J.T.* The 1961 Middletown Oral Poliovirus Vaccine Program. IX. Isolation of enteroviruses from sewage before and after vaccine administration // Yale J. Biol. Med. 1962. V. 34. № 5. P. 512–521.
43. *Rousis N.I., Gracia-Lor E., Hernández F. et al.* Wastewater-based epidemiology as a novel tool to evaluate human exposure to pesticides: Triazines and organophosphates as case studies // Sci. Total Environ. 2021. V. 793. 10 p.
44. *Schifano F.* Misuse and abuse of pregabalin and gabapentin: cause for concern? // CNS Drugs. 2014. V. 28. P. 491–496.
45. *Sims N., Kasprzyk-Hordern B.* Future perspectives of wastewater-based epidemiology: Monitoring infectious disease spread and resistance to the community level // Environ. Int. 2020. V. 139. 13 p.
46. *Sinclair R.G., Choi C.Y., Riley M.R., Gerba C.P.* Pathogen surveillance through monitoring of sewer systems // Adv. Appl. Microbiol. 2008. V. 65. P. 249–269.
47. *Syslová K., Böhmová A., Mikoška M. et al.* Multimarker screening of oxidative stress in aging // Oxid. Med. Cell. Longev. 2014. V. 2014. P. 14.
48. *Thomaidis N.S., Gago-Ferrero P., Ort C., Niki C. et al.* Reflection of Socioeconomic Changes in Wastewater: Licit and Illicit Drug Use Patterns // Environ. Sci. Technol. 2016. V. 50. № 18. P. 10065–10072.
49. *Thomas K.V., Bijlsma L., Castiglioni S. et al.* Comparing illicit drug use in 19 European cities through sewage analysis // Sci. Total Environ. 2012. V. 432. P. 432–439.
50. *Venkatesan A.K., Chen J., Driver E. et al.* Assessing the Potential To Monitor Plant-Based Diet Trends in Communities Using a Wastewater-Based Epidemiology Approach // Wastewater-Based Epidemiology: Estimation of Community Consumption of Drugs and Diets. ACS Symposium Ser. 2019. V. 1319. P. 187–198.
51. *Venkatesan A., Halden R.* Wastewater Treatment Plants as Chemical Observatories to Forecast Ecological and Human Health Risks of Manmade Chemicals // Sci. Rep. 2014. V. 4. 7 p.
52. *Wang W., Kannan K.* Mass loading and emission of benzophenone-3 (BP-3) and its derivatives in wastewater treatment plants in New York State, USA // Sci. Total Environ. 2017. V. 579. P. 1316–1322.
53. *Wong T.H.T., Sui Z., Rangan A. et al.* Discrepancy in socioeconomic status does not fully explain the variation in diet quality between consumers of different coffee types // Eur. J. Nutr. 2018. V. 57. P. 2123–2131.
54. *Wu G.D., Chen J., Hoffmann C. et al.* Linking long-term dietary patterns with gut microbial enterotypes // Sci. 2011. № 7. P. 105–108.
55. *Yatsunenkov T., Rey F.E., Manary M.J., Trehan I.* Human gut microbiome viewed across age and geography // Nature. 2012. № 14. P. 222–227.
56. *Zuccato E., Chiabrando C., Castiglioni S. et al.* Estimating Community Drug Abuse by Wastewater Analysis // Environ. Health Perspectives. 2008. V. 116. № 8. P. 1027–1032.