

Микропластик в системе Нижняя Волга – Северный Каспий: пространственное распределение в зоне смешения вод и источники поступления

М. А. Анциферова *, А. В. Клещенко, А. М. Коршун

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр
Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия

* e-mail: m12antsiferova@mail.ru

Аннотация

Влияние гидрологических и гидрохимических условий на пространственное распределение микропластика в эстуарных зонах изучено слабо. Цель работы – оценка его пространственного распределения, количественных и качественных характеристик в системе Нижняя Волга – Северный Каспий. Материал получен в ходе экспедиционного рейса на НИС «Денеб» в сентябре 2023 г., пробы отбирали тралением нейстонной сети (ячейка 0.3 мм) в поверхностном горизонте (0–0.2 м) с последующей обработкой по модифицированной методике NOAA и прямой визуальной сортировкой под микроскопом. Идентификация полимеров выполнена методами рамановской и ИК-Фурье-спектроскопии с расчетом индекса опасности *PHI*. Параллельно измеряли гидрохимические, гидрологические и метеорологические параметры среды, в частности ионный состав. В Нижней Волге среднее содержание частиц составило 81 шт/м³, пиковые значения – 100 шт/м³ (после ливня в Калмыкии), а также 92 шт/м³ у Волгограда и 98 шт/м³ у Астрахани, что указывает на антропогенный сток как основной источник. В Северном Каспии концентрации частиц существенно ниже (от 3 до 44 шт/м³, среднее 13 шт/м³) с выраженным нисходящим градиентом от устья. Преобладает мелкий микропластик (0.3–2 мм) в виде волокон и фрагментов, преимущественно из полиэтилена, полиэтилентерефталата и полиамида, которые отнесены ко 2-му классу опасности согласно индексу *PHI*. Пространственное распределение частиц коррелирует с динамикой солености, ионного состава (снижение коэффициентов Ca²⁺/Cl⁻ и HCO₃⁻/Cl⁻ в 20 и 80 раз), турбулентным перемешиванием после шторма и ливневыми осадками. В эстуарной зоне разбавление речных вод морскими приводит к значительному снижению количества частиц: с 98 до 44 шт/м³, а затем до 13 шт/м³. Основной источник микропластика – антропогенный сток Волги, включая диффузный смыв с урбанизированных территорий. Уникальность Каспия как замкнутого водоема с мощным речным стоком обуславливает относительно повышенные концентрации микропластика по сравнению с открытыми морями. Полученные данные обосновывают необходимость контроля поверхностного стока и мониторинга эстуарных геохимических барьеров.

© Анциферова М. А., Клещенко А. В., Коршун А. М., 2026



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Ключевые слова: микропластик, Северный Каспий, Нижняя Волга, зона смешения, ионный состав, антропогенное загрязнение

Благодарности: публикация подготовлена в рамках реализации госзадания ЮНЦ РАН, № госрегистрации 125012100503-4. Работа выполнена на оборудовании ЦКП “Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)”, № 501994.

Для цитирования: Анциферова М. А., Клещенок А. В., Коришун А. М. Микропластик в системе Нижняя Волга – Северный Каспий: пространственное распределение в зоне смешения вод и источники поступления // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 2. С. 93–109. EDN EUXOMX.

Microplastics in the Lower Volga–Northern Caspian System: Spatial Distribution in the Water Mixing Zone and Sources of Input

M. A. Antsiferova *, A. V. Kleshchenkov, A. M. Korshun

*Federal State Budgetary Institution of Science "Federal Research Center
Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Rostov-on-Don, Russia*

** e-mail: m12antsiferova@mail.ru*

Abstract

The influence of hydrological and hydrochemical conditions on the spatial distribution of microplastics in estuarine zones has been poorly studied. The study aims to assess microplastics spatial distribution and their quantitative and qualitative characteristics in the Lower Volga–Northern Caspian system. The data were collected during an expedition on R/V *Deneb* in September 2023. The samples were taken using a neuston trawl net (0.3 mm mesh) in the surface layer (0–0.2 m), followed by processing according to a modified NOAA method and direct visual sorting under a microscope. The polymers were identified using the Raman and Fourier-transform infrared spectroscopy, with the PHI hazard index calculated. In parallel, hydrochemical, hydrological and meteorological parameters of the environment were measured, including ion composition. In the Lower Volga, the average particle concentration was 81 particles/m³, with peak values of 100 particles/m³ (following a downpour in Kalmykia), as well as 92 particles/m³ near Volgograd and 98 particles/m³ near Astrakhan, indicating anthropogenic runoff as the primary source. In the Northern Caspian Sea, particle concentrations were significantly lower (ranging from 3 to 44 particles/m³, with an average of 13 particles/m³), showing a pronounced downward gradient from the estuary. Fine microplastics (0.3–2 mm) in the form of fibres and fragments predominated, mainly consisting of polyethylene, polyethylene terephthalate and polyamide, which are classified as hazard class 2 according to the PHI index. The spatial distribution of particles correlates with variations in salinity and ionic composition (a 20- and 80-fold decrease in the Ca²⁺/Cl⁻ and HCO₃⁻/Cl⁻ ratios), turbulent mixing following a storm and shower precipitation. In the estuary zone, the dilution of river water with seawater leads to a significant reduction in particle count: from 98 particles/m³ to 44 particles/m³, and subsequently to 13 particles/m³. The primary source of microplastics is anthropogenic runoff from the Volga, including diffuse runoff from urbanised areas. The specific nature of the Caspian Sea as a closed basin with a significant river runoff results in relatively higher microplastics concentrations than those found in open seas. The obtained data justify the need to control surface runoff and monitor estuarine geochemical barriers.

Keywords: microplastics, Northern Caspian Sea, Lower Volga, mixing zone, ionic composition, anthropogenic pollution

Acknowledgements: The article was prepared under state assignment of SSC RAS no. 125012100503-4. The work was performed using equipment of the Shared Research Facility of SSC RAS, no. 501994.

For citation: Antsiferova, M.A., Kleshchenkov, A.V. and Korshun, A.M., 2026. Microplastics in the Lower Volga–Northern Caspian System: Spatial Distribution in the Water Mixing Zone and Sources of Input. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 93–109.

Введение

Микропластик (МП) представляет собой твердые, нерастворимые в воде частицы синтетических полимеров, отличающиеся неоднородностью характеристик, состава, свойств [1]. Ключевым критерием для отнесения пластика к этой группе является размер частиц – от 0.1–0.3 мм (в зависимости от методов отбора проб [2]) до 5 мм. Значительная вариабельность характеристик МП обуславливает наличие ряда нерешенных вопросов, например касающихся источников поступления частиц, закономерностей их транспорта, количественной оценки, а главное – степени воздействия МП на живые организмы и экосистемы в целом. Одной из основных проблем при оценке концентрации МП в окружающей среде остается отсутствие единых стандартизированных протоколов отбора проб, пробоподготовки и идентификации частиц.

Загрязнение пресноводных сред МП длительное время изучалось менее интенсивно, чем морских, однако в последнее время количество соответствующих исследований растет [3–5]. Объектом этого исследования выступает шельфовая зона Каспийского моря – крупнейшего внутреннего водоема планеты. Его водосборный бассейн формирует сток объемом около 300 км³, более 80 % которого (255 км³) приходится на Волгу [6]. Это определяет особую значимость северной части моря как обширной зоны смешения, где происходит трансформация речного стока. Несмотря на важность региона, проблема загрязнения его МП остается слабо изученной. Существующие публикации преимущественно затрагивают южное (иранское) [7, 8] и западное (казахстанское) [9] побережья. Для южной акватории Каспия средние и медианные концентрации МП составляют 15 и 12 шт/кг в донных отложениях, 710 и 650 шт/м³ в водной толще [10]. Однако комплексных исследований зоны смешения Волги и Каспия до сих пор не производилось.

Наше исследование, кроме Северного Каспия, охватывает Нижнюю Волгу, поскольку именно реки признаны основным источником поступления антропогенного мусора в моря. Нижняя Волга изучалась ранее: проведенные исследования [11] подтвердили наличие МП в поверхностных водах и организмах гидробионтов. Комплексная съемка на обоих водных объектах позволяет оценить особенности пространственного распределения загрязнения и его источники.

Целью работы является оценка содержания МП в водах Нижней Волги и Северного Каспия, анализ особенностей его поступления и пространственного распределения в зоне смешения речных и морских вод, а также определение качественных характеристик и полимерного состава частиц на фоне изменения гидрохимических параметров воды.

Материалы и методы

Материал для исследования был собран в ходе экспедиционного рейса ЮНЦ РАН на НИС «Денеб» в сентябре 2023 г. Станции отбора проб охватывали Нижнюю Волгу (от выхода из Волго-Донского судоходного канала до устьевой области) и северо-западную часть Каспийского моря (от Волго-Каспийского судоходного канала до района Избербаша).

Концентрированные пробы отбирали тралением нейстонной сетью (размер ячеи 0.3 мм) в поверхностном горизонте (0–0.2 м). При отборе учитывали цвет борта и палубы судна для минимизации вторичного загрязнения.

Пробы обрабатывали согласно модифицированному методу *NOAA* [12]. Основные этапы пробоподготовки включали фильтрацию через мелкоячеистый (100 мкм) нейлоновый фильтр, жидкое окисление в перекиси водорода с добавлением железа (реакция Фентона) и плотностное разделение в растворе хлорида цинка ($ZnCl_2$, $\rho = 1.6 \text{ г/см}^3$). Таким образом проба была очищена от основной массы сопутствующего органического и минерального материала.

Количественный, морфометрический и морфологический анализы проводили методом прямой визуальной сортировки под оптическим микроскопом (стерео Микромед МС-1 вар. *2C Digital*, увеличение в 20 раз), в ходе которой подсчитывали число частиц, приведенное к 1 м^3 профильтрованной воды, и описывали их характеристики: форму (волокно, фрагмент, гранула, пленка), цвет, размер.

Состав частиц, предварительно отнесенных к МП методом горячей иглы, анализировали методами спектроскопии комбинационного рассеяния, или рамановской спектроскопии (*RAMOS S120*), и ИК-Фурье спектроскопии (*FSM 2202*). Сначала оба метода использовали параллельно для наиболее характерных образцов из выборки, затем они дополняли друг друга для охвата большего количества образцов и установления широкого перечня полимеров.

На основании данных о полимерном составе рассчитывали общий индекс опасности полимеров (*Polymer Hazard Index, PHI*) в соответствии с методикой, адаптированной для смесей МП в [13], предложенной в работе [14], по формуле

$$PHI = \sum P_n \times S_n,$$

где P_n – доля в процентах частиц обнаруженного полимера конкретного типа; S_n – балл опасности этого полимера по табл. 2 из работы [14, с. 3312–3315]. Полученное значение сравнивали с пороговыми интервалами (табл. 1 из [14, с. 3311]): менее 10 – класс I (незначительный риск), 10–100 – II (умеренный риск), 100–1000 – III (значительный риск), более 1000 – IV (высокий риск). Следует отметить, что, хотя индекс *PHI* широко применяется для предварительной оценки риска, он является упрощенным инструментом, так как не учитывает весь комплекс характеристик частиц, таких как размер, морфология, наличие добавок и степень деградации, которые существенно влияют на экотоксикологический потенциал частиц. Поэтому полученные значения *PHI* следует интерпретировать как первичную индикацию опасности.

Контроль качества проводили на всех этапах работы, использовали исключительно стеклянную лабораторную посуду, тщательно промывали используемые фильтры дистиллированной водой и фильтровали все реактивы

через мелкоячеистые фильтры (100 мкм). В лабораторных условиях анализировали холостые пробы и экспонировали открытые чашки Петри с дистиллированной водой для контроля фонового содержания МП в воздухе. Нижний предел обнаружения частиц составил 0.3 мм, что обусловлено размером ячеек пробоотборной сети. Поэтому полученные концентрации следует рассматривать как заниженные относительно реальных значений [15].

Параллельно с отбором проб МП выполняли мониторинг параметров водной среды. Профили температуры, солености, мутности и плотности измеряли гидрологическим зондом *CTD-48*. Метеорологические параметры регистрировали судовой автоматической станцией.

Пробы воды для гидрохимического анализа отбирали по стандартным океанологическим методам батометром из поверхностного слоя (до 0.5 м). В лаборатории ЮНЦ РАН определяли жесткость воды (ПНД Ф 14.1:2.98-97) и концентрации главных ионов солевого состава исследуемых образцов путем непосредственного анализа хлоридов (ПНД Ф 14.1:2.96-97), сульфатов (ПНД Ф 14.1:2.108-97), гидрокарбонатов (ПНД Ф 14.2.99-97), ионов кальция (ПНД Ф 14.1:2.95-97). Концентрацию ионов магния вычисляли по разности между значениями жесткости и концентрации кальция в эквивалентной форме. Суммарную концентрацию ионов натрия и калия определяли как разность сумм концентраций анионов (хлориды, гидрокарбонаты и сульфаты) и катионов (ионы кальция и магния) в эквивалентной форме (РД 52.24.514-2009).

Для сравнения водных участков, имеющих разную минерализацию, рассчитывали содержание ионов в процентах эквивалентов (%-экв.), при этом принимали сумму анионов, как и сумму катионов, в воде равной 100 %¹⁾. В качестве показателя трансформации солевого состава использовали изменения процент-эквивалентных концентраций солеобразующих ионов.

Для выявления факторов, определяющих пространственное распределение МП в зоне смешения речных и морских вод, параллельно с отбором проб МП анализировали гидрологические и гидрохимические параметры среды. Изменчивость ионно-солевого состава вод Северного Каспия формируется под преимущественным влиянием стока Волги. Статистическая обработка данных осуществлялась в приложении *Microsoft Excel*.

Результаты и обсуждение

Количество и пространственное распределение МП

МП был обнаружен в водной среде на всех станциях.

В Нижней Волге средняя концентрация частиц составила 81 шт/м³ [16]. Наибольшее содержание (100 шт/м³) наблюдалось в районе Калмыкии после сильного ливня, что указывает на вероятный вклад плоскостного смыва и атмосферных осадков. Высокие значения отмечены также вблизи крупных урбанизированных центров: 92 шт/м³ на ст. *1в* у Волгограда и 98 шт/м³ – на ст. *5в* вблизи Астрахани (рис. 1). Минимум (58 шт/м³) зафиксирован ниже ответвления рукава Бузан.

¹⁾ *Алекин О. А.* Основы гидрохимии : учебное пособие. Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. 442 с.

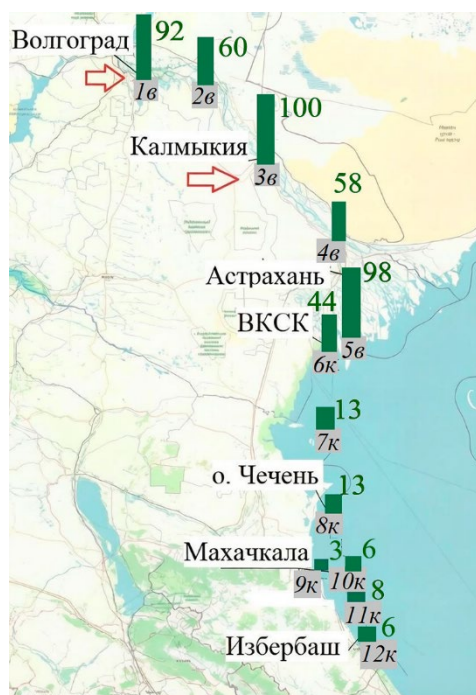


Рис. 1. Карта-схема распределения МП в Нижней Волге и Северном Каспии (сентябрь 2023 г.). Стрелками указаны области повышенного загрязнения, черные цифры – номера станций, зеленые – концентрация МП (шт/м³)

Fig. 1. Schematic map of microplastics distribution in the Lower Volga and North Caspian (September 2023). The arrows show areas of elevated pollution and the numbers above the bars denote microplastics concentrations (particles/m³)

В Каспийском море концентрации частиц МП заметно снижаются по мере удаления от устья Волги. Наибольшее значение (44 шт/м³) зарегистрировано в Волго-Каспийском канале. Повышенное содержание МП относительно остальной части моря сохраняется и на двух последующих станциях (ст. 7к и 8к на рис. 1) около о. Чечень (13 шт/м³). Минимальная концентрация частиц (3 шт/м³) отмечена у побережья в районе Каспийска (ст. 9к). Средний показатель для северо-западной части Каспийского моря при таком широком разбросе значений составляет 13 шт/м³ [17]. Полученные значения согласуются с мировым диапазоном концентраций МП в водных объектах и находятся на уровне средних значений (от 0.3 до 150 шт/м³) [3–5].

Выявленная закономерность подтверждает, что Нижняя Волга, как и многие речные системы мира, является важным источником поступления МП в морскую среду [18]. Установленное содержание МП в реке (в среднем 81 шт/м³) превышает концентрации в Северном Каспии (13 шт/м³). Пиковые значения концентрации МП вблизи крупных городов (Волгоград, Астрахань) указывают на антропогенный источник его поступления – поверхностный сток с урбанизированных территорий. Максимальная концентрация (100 шт/м³) после ливня в районе Калмыкии свидетельствует о вероятном вкладе атмосферных осадков и плоскостного смыва. Прямая связь не доказана, однако подобная ситуация описана и в других исследованиях [19], при этом атмосферные осадки в целом считаются одним из важных путей поступления МП в водные объекты.

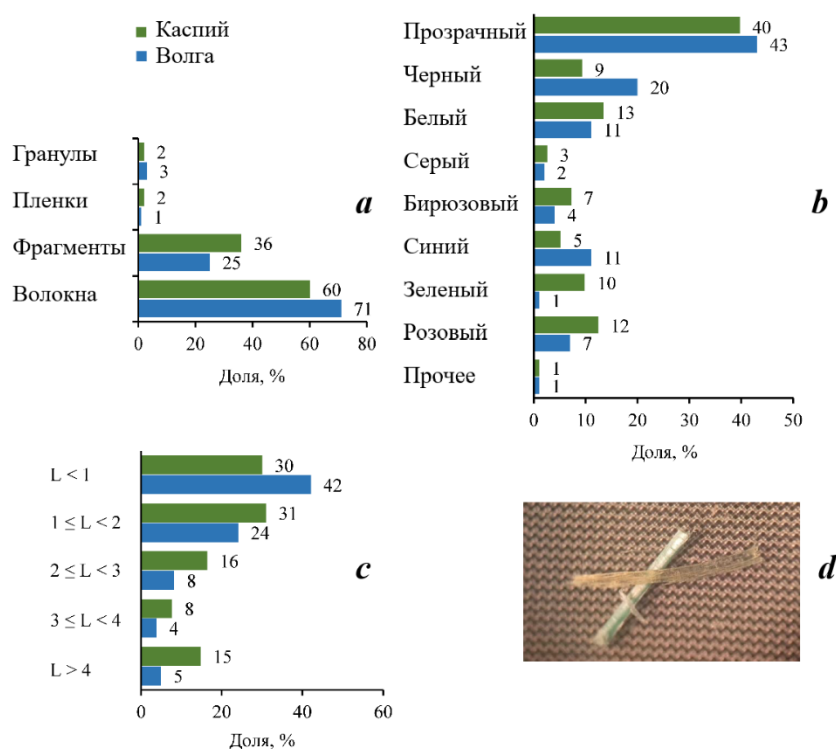
По мере удаления от устья Волги в морской акватории отчетливо наблюдается тенденция к снижению концентрации частиц с последующим небольшим повышением (см. рис. 1). Вследствие замкнутости Каспия и его мощного

речного стока среднее содержание МП в его северо-западной части (13 шт/м³) превышает уровни, типичные для многих открытых морских акваторий [2].

Морфологические и морфометрические характеристики, полимерный состав частиц

Анализ качественных характеристик МП выявил различия между частицами в речной и морской акваториях. В водах Нижней Волги обнаружены главным образом прозрачные нитевидные волокна длиной до 1 мм (мода ряда 0.7 мм). Частицы, окрашенные (наиболее распространенный цвет – черный, белый, синий) и имеющие другую форму (преимущественно фрагменты), встречаются реже (рис. 2, табл.1).

Более разнообразный ассортимент наблюдается в Каспийском море: наряду с волокнами (54 %) широко представлены фрагменты (32 %), а также единичные гранулы и пленки. Цветовая палитра частиц разнообразна, но, как и в реке, преобладают прозрачные образцы, из окрашенных наиболее распространены белые и розовые. В море в размерном ряду доминируют частицы длиной от 0.5 до 2 мм (рис. 2, табл. 1), другие размерные фракции (0.3–0.5 и 2–5 мм) встречались значительно реже.



Р и с . 2 . Распределение МП по характеристикам в Нижней Волге и Каспийском море: по форме (а), цвету (b) и размеру, мм (с). Образцы частиц (d)

Fig. 2. Microplastics distribution by characteristics in the Lower Volga and Northern Caspian Sea: by colour (a), shape (b) and size, mm (c). Particle samples (d)

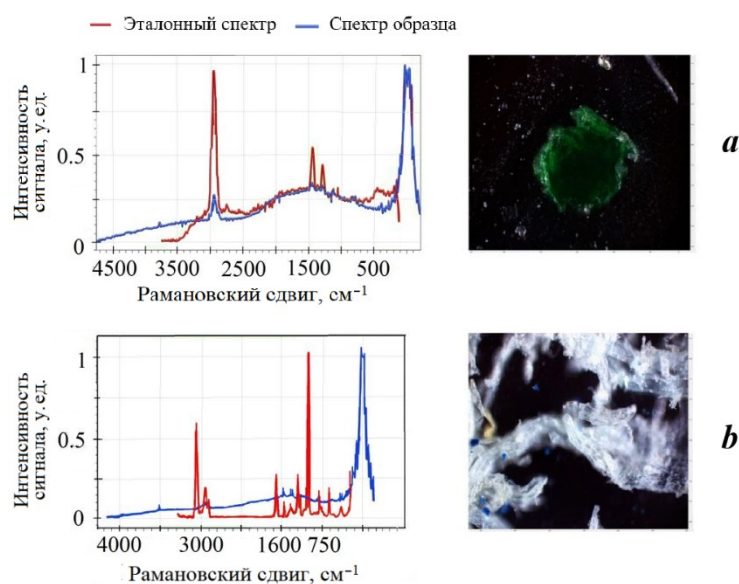
Т а б л и ц а 1. Статистические показатели длины частиц МП, мм

Table 1. Statistical indicators of the microplastics length, mm

Водный объект / Water body	Среднее (\bar{x}) / Average (\bar{x})	Мода (M_o) / Mode (M_o)	Медиана (M_e) / Median (M_e)
Нижняя Волга / Lower Volga	1.5	0.7	1.0
Северный Каспий / Northern Caspian Sea	1.9	0.7	1.3

В общем для двух водных объектов ширина волокон МП составляет от 0.01 до 0.05 мм, а фрагментов – от 1 до 3 мм.

В водах Волги преобладают полиэтилен (ПЭ) низкой и высокой плотности, полиэтилентерефталат (ПЭТФ) и полиамид (ПА). В морских пробах основную массу также составляют ПЭТФ и ПЭ, при этом возрастает доля этиленвинилацетата (ЭВА) (рис. 3). В меньшем количестве в двух водных объектах обнаружены полистирол (ПС) (см. рис. 3), полипропилен (ПП), единично полиуретан (ПУ), поливинилхлорид (ПВХ), поливинилацетат (ПВА), полиоксиметилен (ПОМ), полиметилметакрилат (ПММА).



Р и с. 3. Спектры комбинационного рассеяния (справа) и снимки (слева) полимеров, отобранных в Каспийском море: *a* – полиэтиленивинилацетата; *b* – полистирола

Fig. 3. Spectra of Raman scattering (right) and photos (left) of polymers collected in the Caspian Sea: *a* – polyethylene-vinyl-acetate; *b* – polystyrene

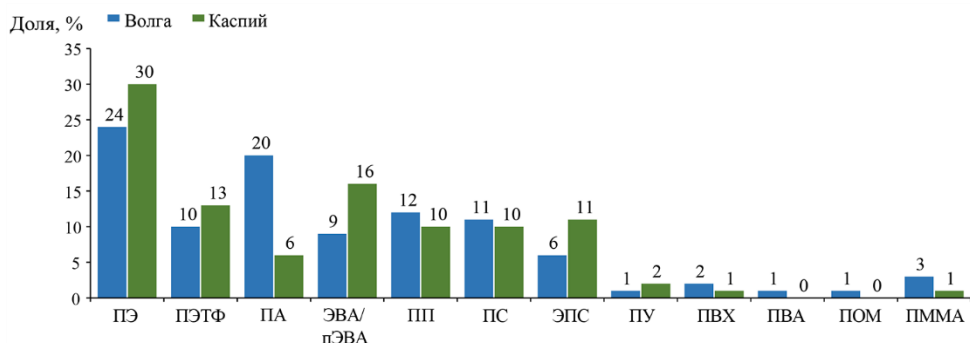


Рис. 4. Процентное распределение частиц по типу полимера. Обозначения: ПЭ – полиэтилен, ПЭТФ – полиэтилентерефталат, ПА – полиамид, ЭВА/пЭВА – (поли)этиленвинилацетат, ПП – полипропилен, ПС – полистирол, ЭПС – экструдированный полистирол, ПУ – полиуретан, ПВХ – поливинилхлорид, ПВА – поливинилацетат, ПОМ – полиоксиметилен

Fig. 4. Percentage of particles by polymer type. Notations: ПЭ – polyethylene, ПЭТФ – polyethylene terephthalate, ПА – polyamide, ЭВА/пЭВА – (poly) ethylene vinyl acetate, ПП – polypropylene, ПС – polystyrene, ЭПС – extruded polystyrene, ПУ – polyurethane, ПВХ – polyvinyl chloride, ПВА – polyvinyl acetate, ПОМ – polyoxymethylene, ПММА – polymethyl methacrylate

Согласно расчетам *PHI*, большая часть полимеров – ПЭ, ПЭТФ, ПА, ПЭВА, ПП, ПС – относится ко 2-му классу опасности (рис. 4). В единичных частицах обнаружены полимеры более высоких классов опасности: ПУ, ПВХ, ПВА, ПОМ, ПММА.

Качественный анализ выявил различия в характеристиках частиц. Для реки типично преобладание мелких волокон, обладающих высоким потенциалом биоаккумуляции. В море возрастает доля более крупных фрагментов и изменяется полимерный состав (рост доли этилвинилацетата), что, вероятно, связано с седиментацией, фрагментацией и селективным переносом. Хотя большинство идентифицированных полимеров относятся ко 2-му классу опасности по индексу *PHI*, реальная экотоксикологическая угроза может быть выше. Как показала рамановская спектроскопия, частицы содержат химические добавки (например, антипирены, красители), которые обладают большей мобильностью и биологической активностью, чем основной полимер. Это подтверждает необходимость такой комплексной оценки опасности МП, которая учитывает не только полимерный состав, но и весь спектр сопутствующих загрязнителей.

Метеорологические условия и гидрологические факторы водной среды

В период экспедиции метеорологические условия изменялись от умеренных при выходе в Волгу (температура воздуха 13.8 °С) до стабильно теплых в Каспийском море (21–21.8 °С) при восточных и северо-восточных ветрах. Ливневые осадки зафиксированы на участке Калмыкии. Шторм произошел 23 сентября.

Ливневые осадки оказали заметное влияние на локальное распределение загрязнителя: максимальная концентрация частиц МП в районе Калмыкии (100 шт/м³) напрямую связана с эффектом плоскостного смыва после сильного дождя, что демонстрирует значимость диффузных источников поступления загрязняющих веществ.

В распределении МП прослеживается закономерность: более высокие концентрации частиц отмечены в реке и относительно низкие – в море при плавном их уменьшении в зоне смешения вод (морской край дельты). Это выражено при переходе от речной станции (6к) к первым морским станциям (7к и 8к) и обусловлено разбавлением речного стока морскими водами. Штормовое перемешивание, вероятно, также повлияло на динамику распределения: согласно данным экспедиционных наблюдений, оно привело к смешению водных масс, что отслеживается в значениях солености и объясняет сходные концентрации МП (13 шт/м³) на станциях до и после о. Чечень.

Соленость воды возрастала от 0.19–0.20 ЕПС на речных станциях до 2.89–11.4 ЕПС в открытой части моря. Мутность максимальна (75.1 ЕМФ) на переходной станции 7к, затем снижается (табл. 2).

Таким образом, отмечено комплексное влияние различных факторов и событий на пространственную динамику МП: непосредственные метеорологические события (ливни, штормы), провоцирующие диффузное попадание и перемешивание вод, и гидрологические факторы, среди которых ключевую роль играет речной сток как основной источник поступления частиц в море.

Т а б л и ц а 2. Гидрологические параметры водной среды

T a b l e 2. Hydrological parameters of the aquatic environment

Станция / Station	S, ЕПС / S, PSU	Плотность, kg/m ³ / Density, kg/m ³	pH	Мутность, ЕМФ / Turbidity, FTU	T, °C	Прозрачность, м / Transparency, m
1в	0.19	998.38	7.83	4.70	19.80	2.10
2в	0.19	998.40	7.75	7.50	19.70	2.60
3в	0.20	998.44	7.68	8.20	19.60	1.60
4в	0.20	998.39	7.84	9.83	19.00	1.40
5в	0.19	998.40	7.79	7.28	19.80	1.10
6к	0.20	998.43	7.36	15.40	19.60	–*
7к	2.89	1000.18	7.31	75.10	21.00	0.30
8к	10.31	1005.73	6.50	55.70	21.20	0.50
9к	11.17	1006.29	6.33	16.70	21.60	0.80
10к	11.34	1006.28	6.23	8.94	22.20	1.40
11к	11.36	1006.46	6.31	2.88	21.50	5.00
12к	11.29	1006.37	5.97	6.14	21.70	8.00

* Прозрачность не измерялась, так как пробы отбирали в вечернее время.

П р и м е ч а н и е. Обозначения: S – соленость; T – температура.

* Transparency was not measured because the samples were taken in the evening.

N o t e : S – salinity; T – temperature.

Ионно-солевой состав вод в зоне смешения

В рамках данного исследования ионно-солевой состав рассматривается исключительно как фоновый параметр среды, характеризующий физико-химические условия акватории. Детальное сопоставление данных о составе и распределении частиц МП не производится, однако понимание базовой гидрохимической обстановки необходимо для корректной интерпретации зоны смешения как области потенциальной аккумуляции загрязнителей. Так как МП является частью взвешенного вещества, то ожидаются похожие закономерности распределения частиц МП и распределения взвешенного вещества [20], в связи с чем параллельно проведен анализ ионного состава вод изучаемой акватории (см. рис. 5, 6).

Солевой состав Северного Каспия формируется под воздействием нескольких факторов. Основным из них является сток Волги, влияние которого распространяется на всю толщу вод этой мелководной части моря. В восточной части оказывают влияние уральские воды, которые по содержанию некоторых компонентов отличаются от волжских. С юга приходит вода из Среднего Каспия с уже установившимся ионным составом. В результате смешения этих водных масс в Северном Каспии образуются воды разного солевого состава – от опресненных вод с хлорностью менее 1 ‰ до близких к истинным каспийским водам²⁾.

Пространственная изменчивость солевого состава вод северо-западного Каспия, находящихся под определяющим влиянием стока Волги, отражает сложные процессы смешения, разбавления, физико-химического взаимодействия и биологической трансформации. Ионно-солевой состав волжских и каспийских вод представлен в табл. 3. Резкие колебания минерализации воды наблюдаются в эстуарной зоне.

Анализ трансформации ионно-солевого состава на границе река – море наиболее репрезентативен при рассмотрении относительных концентраций ионов (%-экв.). В зоне смешения пресных вод Волги с солеными водами Каспия с ростом минерализации наблюдается так называемый солевой барьер, характеризующийся изменением относительных концентраций анионов и катионов (рис. 5).

В эстуарной зоне, где наблюдается резкий рост минерализации, выявлены следующие закономерности. В группе анионов хлориды становятся доминирующими уже при минерализации выше 4.46 г/кг, достигая значений более 60 %-экв. В отличие от них, сульфаты демонстрируют незначительную тенденцию к убыванию. Концентрации гидрокарбонат-ионов, никогда не выходящие на лидирующие позиции в морских водах, наиболее резко снижаются на границе река – море: в зоне смешения их относительные значения уменьшаются более чем в 10 раз.

Среди катионов в зоне смешения доминирует ион натрия, чья доля и монотонно возрастает с ростом минерализации (от 30 до 65 %-экв.). Положительный тренд характерен и для ионов магния: с удалением от устья его относительная концентрация плавно увеличивается. В противоположность

²⁾ Пахомова А. С., Затучная Б. М. Гидрохимия Каспийского моря. Ленинград : Гидрометеоздат, 1966. 343 с.

Т а б л и ц а 3. Пространственная изменчивость ионно-солевого состава вод Нижней Волги и Северного Каспия в сентябре 2023 г. (период экспедиционных исследований ЮНЦ РАН)

Table 3. Spatial variability of the ion-salt composition in the Lower Volga and Northern Caspian waters in September 2023 (the period of expeditionary studies of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences)

1. Нижняя Волга / Lower Volga

Станция / Station	Минерализация, мг/л / Mineralization, mg/L	Концентрация, мг/л / Concentration, mg/L					
		Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺
1в	286.70	31.91	117.16	48.10	56.87	12.16	20.50
2в	299.68	39.00	122.04	46.49	53.95	10.70	27.50
5в	309.58	35.45	129.36	46.49	47.15	13.13	38.00

2. Северный Каспий / Northern Caspian

Станция / Station	Минерализация, г/кг / Mineralization, g/kg	Концентрация, г/кг / Concentration, g/kg					
		Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺
7к	4.46	1.77	0.17	0.96	0.13	0.21	1.22
9к	13.38	5.32	0.24	3.17	0.33	0.72	3.60
11к	13.32	5.14	0.24	3.36	0.34	0.76	3.48
12к	13.97	5.67	0.26	3.17	0.34	0.77	3.76

этому ион кальция, который преобладает в пресных устьевых водах (более 40 %-экв. в Нижней Волге) при минерализации до 1 г/л, резко теряет свою значимость при контакте с морской средой: уже на первой морской станции (7к) его относительная концентрация снижается приблизительно в пять раз.

В работе «О формировании солевого барьера в Азовском, Каспийском и Аральском морях» показано, что при смешении вод в эстуарных зонах наблюдаются все стадии перехода между гидрокарбонатно-кальциевыми и хлоридно-натриевыми водами [21]. Эволюция ионно-солевого состава в зоне смешения речных и морских вод носит ярко выраженный стадийный характер. Первая и наиболее динамичная стадия (минерализация от 0.3 до 4.46 г/кг) сопровождается кардинальной перестройкой солевого комплекса: резкое увеличение доли хлоридов на фоне снижения концентраций сульфатов и гидрокарбонатов приводит к смене гидрокарбонатного класса вод на хлоридный, а катионного состава – с кальциевого на натриевый. На второй стадии (минерализация от 4.46 до 13.38 г/кг) ионный состав вод зоны смешения приближается к составу вод Северного Каспия. Наконец, на третьей стадии (минерализация выше 13.38 г/кг) доминирующее влияние морской составляющей сохраняется, однако интенсивность обогащения воды морскими ионами (хлоридами и натрием) значительно снижается.

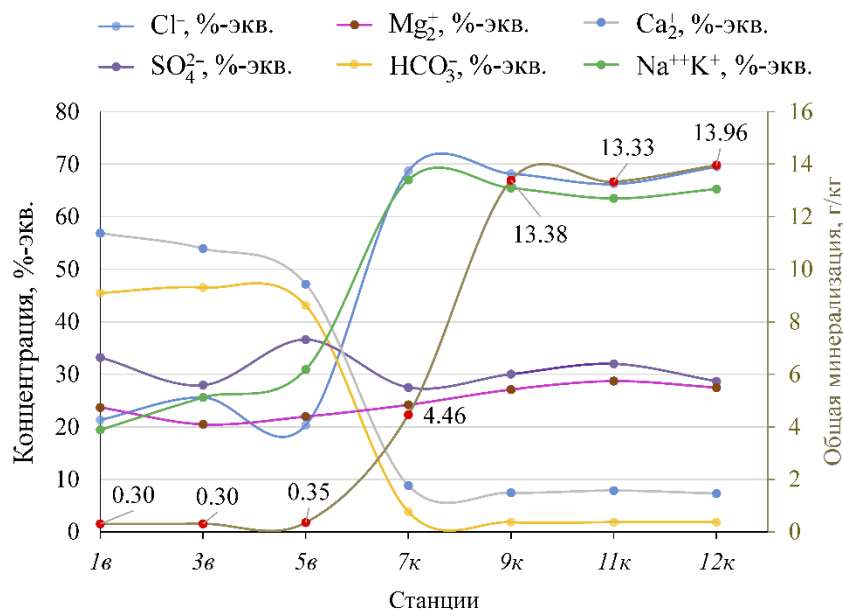


Рис. 5. Пространственная изменчивость относительных концентраций ионно-солевого состава вод Нижней Волги и Северного Каспия в сентябре 2023 г. (период экспедиционных исследований ЮИЦ РАН)

Fig. 5. Spatial variability in the relative concentrations of the ionic and salinity composition of waters in the Lower Volga and the Northern Caspian Sea in September 2023 (the period of expeditionary studies of SSC RAS)

Переход от пресных вод к водам зоны смешения иллюстрирует рис. 6. Изменение ключевых межиионных коэффициентов демонстрирует выраженную нелинейность в зоне смешения. На первой стадии, в интервале солености 0–0.2 ЕПС, фиксируются максимальные значения ключевых межиионных коэффициентов. Однако уже в следующем диапазоне 0.2–2.89 ЕПС происходит их резкое снижение. На второй, более продолжительной стадии смешения (соленость 2.89–11.36 ЕПС) метаморфизация водной массы усиливается. Коэффициенты Ca^{2+}/Cl^{-} и HCO_3^{-}/Cl^{-} , наиболее чувствительные к поступлению морской воды, значительно уменьшаются – примерно в 20 и 80 раз соответственно по сравнению с их значениями в волжской воде на морском краю дельты, тогда как коэффициенты $Na^{+}+K^{+}/Cl^{-}$ и SO_4^{2-}/Mg^{2+} при общем росте солености снижаются лишь в 1.62 и 1.60 раза, что свидетельствует об их относительной стабильности [12].

Важно отметить, что резкое снижение концентрации МП (с 44 до 13 шт/м³) происходит синхронно с первой, наиболее контрастной стадией трансформации ионного состава (минерализация от 0.3 до 4.46 г/кг, соленость до ~ 3 ЕПС) при смене химического состава вод с карбонатно-кальциевого на хлоридно-натриевый.

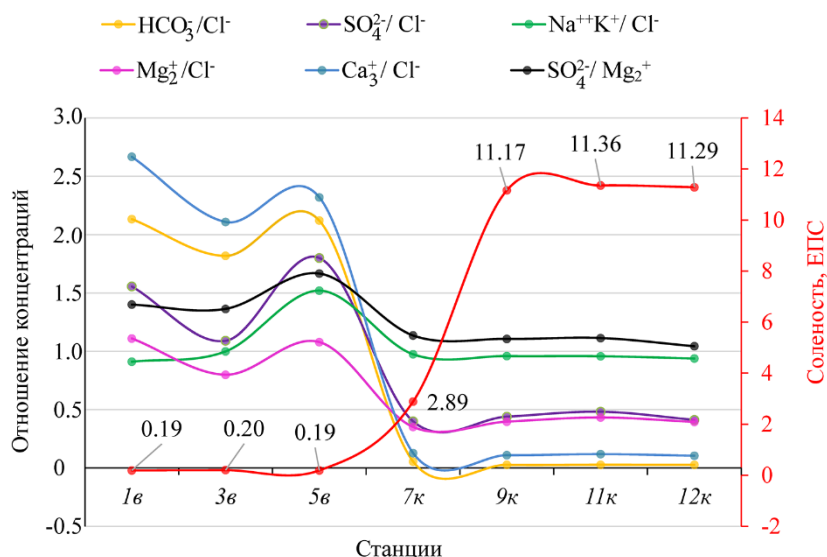


Рис. 6. Относительные величины солеобразующих компонентов и соленость воды в Нижней Волге и Северном Каспии в сентябре 2023 г. (период экспедиционных исследований ЮНЦ РАН)

Fig. 6. Relative values of salt-forming components and salinity of water in the Lower Volga and the Northern Caspian in September 2023 (the period of expedition studies at the SSC RAS)

По мере удаления от устья Волги наблюдается последующее увеличение минерализации от 4.46 до 13.38 г/кг, что соответствует фазе активной подстройки состава смешанных вод к характеристикам морской среды Северного Каспия. При смене этих зон (удаление от границы река – море) фиксируется наиболее значимое для Каспийского моря снижение количества МП с 44 шт/м³ на ст. 6к до 13 шт/м³ на двух последующих станциях 7к и 8к. С увеличением минерализации до 13.38 г/кг (соленость более 11 ЕПС) процесс роста концентрации морских ионов существенно замедляется, что свидетельствует о выходе системы на стадию относительной химической стабилизации, или можно сказать о полном разбавлении речных вод морскими. Минимальное количество частиц МП (3 шт/м³) и заметное увеличение фракционного состава частиц наблюдается при переходе в область стабилизации морских ионов (соленость более 11 ЕПС).

Обнаруженная корреляция позволяет предположить, что процессы, формирующие геохимический барьер в эстуарии (коагуляция, флокуляция, седиментация взвеси), вероятно, воздействуют и на перенос МП. Данное предположение согласуется с концепцией маргинального фильтра, активная гравитационная ступень которого в Каспии расположена между изогалинами 0.2 и 2 ЕПС [22] – именно в этом интервале солености наблюдается наиболее значимое падение концентраций МП.

Таким образом, на распределение МП в прибрежно-шельфовой зоне Северного Каспия влияет комплекс факторов, к которым относятся: 1) интенсивность и локализация антропогенной нагрузки в речном бассейне; 2) режим речного стока; 3) метеорологические и гидродинамические условия (например, штормовое перемешивание, зафиксированное в период работ). Учет этих факторов необходим для разработки научно обоснованной системы мониторинга и мер по обеспечению экологической безопасности уязвимой экосистемы Каспийского моря.

Выводы

МП обнаружен на всех станциях в водах Нижней Волги и Северного Каспия. В реке его количество варьирует от 58 до 100 шт/м³, в среднем составляя 81 шт/м³, пиковые значения зафиксированы вблизи крупных городов и после обильных атмосферных осадков. Это подтверждает роль реки как основного источника поступления антропогенного пластика в Северный Каспий. В самом море крайние значения концентраций частиц МП колеблются от 3 до 44 шт/м³ со средним в 13 шт/м³. Относительно повышенные по сравнению с другими открытыми морями числовые показатели обусловлены замкнутостью водоема и мощным речным стоком.

Максимальное снижение количества частиц МП (с 44 до 13 шт/м³) происходит параллельно с фазой резкой трансформации ионного состава (0.3–4.46 г/кг), а наименьшее значение (3 шт/м³) и изменение фракционного состава наблюдаются одновременно с достижением химической стабилизации в высокоминерализованных водах (более 13.38 г/кг). Так как пластик химически инертен, сама трансформация вод не оказывает влияния на его распределение, однако механизм разбавления и последующего распределения частиц в водной массе большего объема влияет на наблюдаемую пространственную динамику.

Определены качественные характеристики МП. Преобладают преимущественно прозрачные образцы, мелкие волокна (до 2 мм) и окрашенные фрагменты из полиэтилена, ПЭТФ и полиамида, относящиеся ко 2-му классу потенциальной опасности. Обнаружение в частицах токсичных добавок (красителей, антипиренов) указывает на необходимость оценки комплексного химического риска, а не только полимерной матрицы.

Водная среда, где рассматривается загрязнение МП, является зоной смешения с выраженной стадийностью трансформации водных масс. Перестройка химического состава вод происходит на начальном этапе, до минерализации 4.46 г/кг, на котором фиксируется смена гидрокарбонатно-кальциевого класса на хлоридно-натриевый. Подтверждением высокой контрастности среды служит нелинейное изменение межйонных коэффициентов ($\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$), снижающихся в десятки раз. Это свидетельствует о неоднородном гидрохимическом фоне, который определяет специфические условия осаждения и транзита ВВ в области антропогенного загрязнения.

Полученные результаты могут послужить научной основой для разработки системы мониторинга и мер по снижению антропогенной нагрузки. Они подчеркивают критическую важность контроля поверхностного стока с урбанизированных территорий и сохранения функциональной целостности эстуарных зон смешения для обеспечения долгосрочной экологической безопасности уникальной и уязвимой прибрежно-шельфовой экосистемы Каспийского моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rochman C. M., Brookson C., Bikker J., Djuric N. et al.* Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2019. Vol. 38, iss. 4. P. 703–711. <https://doi.org/10.1002/etc.4371>
2. *Чубаренко И. П., Есюкова Е. Е., Хатмуллина Л. И., Лобчук О. И. и др.* Микропластик в морской среде. Москва : Научный мир, 2021. 520 с. EDN ROUYQE.
3. *Франк Ю. А., Воробьев Е. Д., Рахматуллина С. Н., Трифонов А. А. и др.* Скрининг содержания микропластика в поверхностных водах российских рек // *Экология и промышленность России*. 2022. Т. 26, № 9. С. 67–71. EDN FKIKDR. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-9-67-71>
4. *Frank Y. A., Vorobiev E. D., Vorobiev D. S., Trifonov A. A. et al.* Preliminary screening for microplastic concentrations in the surface water of the Ob and Tom rivers in Siberia, Russia // *Sustainability*. 2021. Vol. 13, iss. 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.3390/su13010080>
5. *Gao S., Orłowsky N., Bopf F. K., Breuer L.* Review on microplastics in large European rivers // *WIREs Water*. 2024. Vol. 11, iss. 3. e1713. <https://doi.org/10.1002/wat2.1713>
6. *Михайлов В. Н.* Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. Москва : ГЕОС, 1997. 413 с.
7. *Nematollahi M. J., Moore F., Keshavarzi B., Vogt R. D.* Microplastic particles in sediments and waters, south of Caspian Sea: Frequency, distribution, characteristics, and chemical composition // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Vol. 206. 111137. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111137>
8. *Manbohi A., Mehdinia A., Rahnama R., Hamzehpour A. et al.* Distribution of microplastics in upstream and downstream surface waters of the Iranian rivers discharging to the southern Caspian Sea // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30, iss. 40. P. 92359–92370. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28898-8>
9. *Taghizadeh Rahmat Abadi Z., Abtahi B., Grossart H.-P., Khodabandeh S.* Microplastic content of Kutum fish, *Rutilus frisii kutum* in the southern Caspian Sea // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 752. 141542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141542>
10. *van Emmerik T. H. M., González-Fernández D., Laufkötter C., Blettler M. et al.* Focus on plastics from land to aquatic ecosystems // *Environmental Research Letters*. 2023. Vol. 18, iss. 4. 040401. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acc086>
11. *Литвинов К. В., Калмыков А. П., Бирюкова М. Г.* Микропластик как новый компонент в экосистеме нижней зоны дельты Волги // *Астраханский вестник экологического образования*. 2020. № 6(60). С. 147–152. EDN BHIZQK. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2020-19-6-147-152>
12. *Зобков М. Б., Есюкова Е. Е.* Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и биоты // *Океанология*. 2018. Т. 58, № 1. С. 149–157. EDN YPKSDV. <https://doi.org/10.7868/S0030157418010148>
13. *Xu P., Peng G., Su L., Gao Y. et al.* Microplastic risk assessment in surface waters: a case study in the Changjiang Estuary, China // *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 133. P. 647–654. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.020>
14. *Lithner D., Larsson Å., Dave G.* Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition // *Science of the Total Environment*. 2011. Vol. 409, iss. 18. P. 3309–3324. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.038>
15. *Анциферова М. А., Глушко А. Е., Беспалова Л. А., Клеценков А. В. и др.* Микропластик в воде и проблемы его определения (на примере водных объектов Юга европейской части России) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия География. Геоэкология*. 2025. № 1. С. 115–124. EDN XDCGJK. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/1/115-124>

16. *Анциферова М. А.* Микрочастицы полимеров: содержание, распределение в нижнем течении Волги // Экология. Экономика. Информатика. 2024. Т. 1, № 9. С. 19–21. EDN AYIRGF. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2024-1-9-19-21>
17. *Анциферова М. А.* Концентрации микропластика в водах Северного Каспия // Стратегические проблемы, угрозы и риски Азовского бассейна и Приазовья («Опасные явления – V»). Материалы V Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова, Ростов-на-Дону, 10–14 июля 2024 г. Ростов-на-Дону : ЮНЦ РАН, 2024. С. 277–279. EDN JDBAKZ.
18. *Yakushev E., Gebruk A., Osadchiev A., Pakhomova S. et al.* Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers // Communications Earth & Environment. 2021. Vol. 2. 23. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00091-0>
19. *Werbowski L. M., Gilbreath A. N., Munno K., Zhu X. et al.* Urban Stormwater Runoff: A Major Pathway for Anthropogenic Particles, Black Rubbery Fragments, and Other Types of Microplastics to Urban Receiving Waters // ACS ES&T Water. 2021. Vol. 1, iss. 6. P. 1420–1428. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.1c00017>
20. *Кравчишина М. Д., Ключиткин А. А., Лукашин В. Н., Политова Н. В. и др.* Распределение взвешенного вещества в Каспийском море // Метеорология и гидрология. 2018. № 10. С. 96–107. EDN VKOWLE.
21. *Цыцарин А. Г., Лобов А. Л.* О формировании солевого барьера в Азовском, Каспийском и Аральском морях // Метеорология и гидрология. 1995. № 6. С. 84–94.
22. *Лисицын А. П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747.

Поступила 04.02.2026 г.; одобрена после рецензирования 09.03.2026 г.; принята к публикации 19.03.2026 г.; опубликована 30.06.2026 г.

Об авторах:

Анциферова Марина Артуровна, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0009-0006-6549-8606**, **SPIN-код: 3063-3180**, m12antsiferova@mail.ru

Клещенков Алексей Владимирович, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7976-6951**, **Scopus Author ID: 57016697100**, **ResearcherID: E-6619-2014**, **SPIN-код: 3552-0913**, kle-aleksej@yandex.ru

Коршун Анна Михайловна, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41), кандидат географических наук, **SPIN-код: 1268-8101**, a_korshyn@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Анциферова Марина Артуровна – получение материала в экспедиционных рейсах, отбор и обработка проб, интерпретация данных о содержании микропластика, составление текста рукописи и графического материала

Клещенков Алексей Владимирович – общее руководство работ, получение и интерпретация экспедиционных гидрологических и метеорологических данных, составление текста рукописи и графического материала

Коршун Анна Михайловна – интерпретация данных по ионному составу вод, составление текста рукописи и графического материала

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.