

УДК 550.4.08

Е. Е. Есюкова*, А. В. Багаев, А. И. Мизюк, И. П. Чубаренко

ПЛАВУЧИЙ МУСОР НА ПЛЯЖАХ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКИ: НАБЛЮДЕНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,

Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

*E-mail: elena_esiukova@mail.ru

В работе затронуты экологически важные вопросы транспорта и осадения морского микропластика на пляжах юго-восточной Балтики (Калининградская область, Россия), связанные с нарастающим загрязнением вод Балтийского моря мелкими частицами пластика. Представлены результаты наблюдений и анализ состояния пляжа на предмет присутствия различных видов микропластика. Приведены результаты численного моделирования с помощью разработанной модели лагранжева переноса частиц (MARBLE), воспроизводящий поведение и транспорт частиц пластика в Балтийском море с учётом свойств этих частиц. Приложение этого инструмента к изучению процесса переноса частиц микропластика направлено на выявление наиболее вероятных мест его накопления в Балтийском море. Дан сравнительный анализ результатов моделирования с результатами наблюдений на пляже.

Ключевые слова: микропластик; мусор; плавучий; Балтийское море; пляж; моделирование, MARBLE.

FLOATING LITTER ON THE BEACHES OF THE SOUTHEASTERN BALTIC SEA: OBSERVATIONS AND NUMERICAL MODELING

E. E. Esiukova*, A. V. Bagaev, A. I. Mizyuk, I. P. Chubarenko

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences

36, *Nahimovskiy prospekt, Moscow, Russia, 117997*

*E-mail: elena_esiukova@mail.ru

Ecologically important issues of transport and sedimentation of marine microplastics on the beaches of the southeastern Baltic Sea (Kaliningrad region, Russia), related to the increasing pollution of Baltic Sea waters by small plastics particles, are considered. The data from observation and analysis of the presence on the beach of various types of microplastics are reported. The results of numerical modeling by means of the developed model of Lagrangian particle transport (MARBLE), reproducing the behavior and transport of plastic particles in the Baltic Sea (taking into account the properties of these particles), are presented. This tool is applied to study the process of microplastic particles transport, with the goal to identify the most probable places of their accumulation in the Baltic Sea. A comparative analysis of the simulation results with the results of observation on the beaches is presented.

Keywords: microplastic; litter; floating; Baltic Sea; beach; modeling, MARBLE.

Экологическая проблема, которая практически не освещена в отечественной научной печати — это загрязнение морской среды пластиковыми частицами, в том числе и микропластиком. В настоящее время для Балтики и Мирового Океана в целом задачи изучения физических и динамических свойств частиц микропластика, разработка методов описания их движения относятся к числу жизненно важных. В работе проведён сравнительный анализ результатов численного моделирования распределения частиц микропластика с данными, полученными из анализа пляжных образцов, собранных вдоль побережья юго-восточной Балтики (ЮВБ). Разработка нового блока транспорта к численной модели, учитывающего

определённые свойства частиц микропластика, представляет широкий интерес и значительную практическую ценность.

ВВЕДЕНИЕ

Общемировой выпуск пластика в настоящее время достигает 275–299 млн. т/год [16, 29, 34, 36], но масштабы его переработки несоизмеримо ниже [23, 34], что приводит к его поступлению и накоплению в окружающей среде. Пластиковые материалы представляют собой органические полимеры с различными характеристиками и свойствами, такими как различная плотность и химический состав. Наиболее часто используемыми

пластиковыми материалами являются полипропилен (PP), полиэтилен (PE, включая полиэтилен высокой и низкой плотности — HDPE и LDPE, соответственно), поливинилхлорид (PVC), полиуретан (PUR), полиэтилентерефталат (PET) и полистирол (PS), которые составляют приблизительно 90 % всего мирового производства [19, 24, 37]. Пластик на сегодняшний день является одним из наиболее востребованных материалов и используется практически во всех областях промышленности, и теперь пластиковый мусор, обломки и частицы пластика повсеместно распространены в морях и океанах [19, 41]. Значительную роль в поступлении пластика в морскую среду играет непосредственное поступление хозяйственно-бытовых сточных вод в береговую зону морей, загрязнение береговой полосы при рекреации, пластиковый мусор, поступающий с судов, остатки рыболовного снаряжения и т.д. [19, 41]. Долговечность является общей чертой большинства пластмасс, и именно это свойство, в сочетании с отсутствием возможностей эффективно утилизировать и перерабатывать пластик с конечным сроком службы, привело к тому, что морские пластики и микропластик (частицы пластика размером менее 5 мм) стали глобальной проблемой, как трансграничной, так и социальной, экономической и экологической [41]. В окружающей среде пластики присутствуют в широком диапазоне размеров [7, 19, 21, 37, 42]. Крупные пластиковые объекты подвергаются медленному, но постоянному разрушению под воздействием солнечной радиации, механического разрушения и биodeградации [13, 28, 32, 38], порождая огромное количество микрочастиц, которые и несут наибольшую опасность для окружающей среды.

Артур с соавторами [4] дали определение микропластиков как «фрагментов и первичных пластиков размером менее 5 мм». Тем не менее, продолжается дискуссия о минимальных размерах для «микропластиков» [3, 9, 11, 25, 29, 37, 42], поскольку он напрямую зависит от методов отбора проб и обработки [21, 28, 42]. Поскольку используются различные нижние и верхние предельные размеры, большое количество данных о распределении микропластика в окружающей среде не может быть использовано для анализа. Андради [3] предложил добавить термин «мезопластики», чтобы различать мелкие частицы пластика, видимые невооруженным глазом, и те, которые можно увидеть только с помощью дополнительной техники (микроскопа). В документах European MSFD technical subgroup on Marine Litter [18] предложена классификация для выделения «малых» (SMPs: <1 мм) и «крупных» (LMPs: 1–5 мм) микропластиков.

Микропластики присутствуют в окружающей среде как «первичные микропластики» (промышленные гранулы, которые служат в качестве основы для изготовления пластмассовых изделий, волокна или микрошарики, добавляемые в качестве абразивов в косметические и моющие средства [3, 19, 21, 37]), а также «вторичные микропластики», которые возникают при воздействии физических, химических или биологических факторов деградации на более крупный пластиковый мусор.

Многие живые организмы воспринимают микропластик как источник пищи [8, 12, 29, 43]. Поскольку пластик не разлагается их ферментативной системой, уже само по себе проглатывание пластика представляет угрозу для них и может вызывать летальный исход [12, 15, 20, 24]. Частицы микропластика способны адсорбировать на своей поверхности огромный спектр загрязняющих веществ [15, 21, 22, 29, 33], становясь тем самым вторичным источником и проводником поступления загрязнителей внутрь водных организмов. Загрязняющие вещества, накапливаясь, перемещаются вверх по пищевой цепи и концентрируются как в организмах высших хищников, так и в организме человека [24, 29].

Описание физических свойств и транспорта частиц требует более строгих определений для классов размеров. В дальнейшем мы будем придерживаться следующей размерной классификации: нанопластик < 1 мкм, микропластик < 5 мм, мезопластик < 25 мм, макропластик > 25 мм, мегапластик > 1 м [19].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Район наблюдений и мониторинга пляжей охватывает российский сектор юго-восточной части Балтийского моря — побережье Калининградской области (рис. 1). Длина побережий Калининградской области составляет 147 км; оно включает в себя песчаные пляжи (например, на Куршской и Вислинской косах) и комплекс ледниковых и водно-ледниковых отложений (клифов) побережья Самбийского полуострова [27, 40] (рис. 1). Побережья подвержены действию северных и западных ветров, особенно сильных в осенне-зимний период [26, 39, 40]. Антропогенное загрязнение в этом районе происходит в основном за счет судоходства, рыболовства, берегоукрепления, строительства, рекреации и туризма, бытовых и промышленных стоков из прибрежных поселений и городов, добычи полезных ископаемых и т.д. [39]. Акваторию ЮВБ характеризует сложный и крайне изменчивый гидродинамический режим [1], который обусловлен сложным рельефом дна, конфигурацией берего-

вой линии, ветровым режимом, особенностями общей циркуляции Балтики, стоком крупных рек, таких как Неман, Преголя и Висла, и проливов, соединяющих Куршский и Вислинский заливы с морем.

Актуальной на современном этапе изучения проблемы является разработка современной численной модели, воспроизводящий поведение и транспорт частиц пластика в Балтийском море с учётом свойств этих частиц. Важно приложение этого инструмента к изучению процесса переноса частиц микропластика, к выявлению как наиболее вероятных мест его накопления в Балтийском море (самые уязвимые территории), так и потенциально наиболее «эффективных» (с точки зрения быстрого распространения по всей акватории) источников загрязнения. Сложная физика процессов в прибрежной зоне, связанная со многими факторами (ветровое воздействие, течения различной природы, транспорт наносов, антропогенное влияние и т. д.) влияет на поведение, деградацию, транспорт пластика из моря на берег и обратно [10]. Без анализа состояния пляжа сложно оценить «жизнь» и пластика в целом, и конкретно микропластика в прибрежной зоне моря. В ходе наших исследований ставилась задача понять, присутствует ли макро/мезо/микропластик на берегу, и если да, то каков количественный и качественный состав микропластика (0,5–5 мм) на пляжах Калининградской области, насколько отличается распределение микропластика в зависимости от места расположения точек отбора проб (пляжи возле городов-курортов с высоким антропогенным влиянием или достаточно пустынные малопосещаемые участки берега). Затем было проведено численное моделирование на разработанной модели переноса микропластика MARBLE, и в этой работе представлены некоторые его результаты и первый сравнительный анализ с результатами наблюдений, проведёнными на пляжах Калининградской области.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Береговые наблюдения, отбор и обработка пляжных образцов

При проведении береговых экспедиций отмечено значительное количество мелкого мусора различной природы, и визуально выделяются цветные микрочастицы диапазона <5 мм и более крупные (мезочастицы >5 мм, макрочастицы >25 мм) — большое количество окурков и фильтров от сигарет, частиц вспененного полистирола, одноразовой посуды, синтетических волокон от пластиковых мешков, обвязок и оплётков, а также куски парафина. Наблюдаются мегаобъекты (более 1 м) — упаковочная тара, мешки, куски

канатов, тросов и строп, клубки спутанной лески и рыболовных сетей, остатки пластиковых контейнеров, строительного мусора, и т. д. (рис. 1). Наблюдения показывают, что при экстремальных штормовых размывах берега (достаточно частое явление на Калининградском побережье) происходит обнажение несанкционированных мест свалки мусора, погребенных остатков берегозащитных сооружений, кабелей, труб и т. д., что приводит к дополнительному загрязнению пляжей, особенно пластиком. После штормов концентрация мусора и пластика в зоне заплесков значительно увеличивается (рис. 1).

Отбор проб из верхнего слоя на пляже (область линии штормового заплеска) (60 образцов из 13 различных районов Калининградского побережья в период с июня 2015 по январь 2016 гг., рис. 1) производился с использованием рамки площадью $S = 0,15 \text{ м}^2$, с помощью совка для отбора проб до глубины 2 см, с проведением фотосъёмки, упаковкой образцов в пластиковые пакеты с маркировкой и ведением протокола. В каждом из тринадцати районов отбиралось 2–7 образцов из разных точек заплеска на некотором удалении друг от друга. Собранные образцы просушивались и просеивались через каскад сит (0,5–5 мм), затем с помощью оптического микроскопа и УФ-лампы были отобраны частицы пластика (рис. 2). К 20 % образцов дополнительно был применён более детальный метод анализа — модифицированный метод NOAA [30, 45] с использованием этапов плотностной сепарации в растворе ZnCl_2 (плотностью $1,6 \text{ г/см}^3$) и жидкого окисления (H_2O_2 (30 %) с добавлением катализатора при температуре $75 \text{ }^\circ\text{C}$), подробности см. в работе [17].

Моделирование

Для исследования поведения плавучего мусора в море, был разработан дополнительный блок переноса частиц с задаваемыми свойствами к широко используемой численной модели с открытым кодом NEMO. Численное моделирование в данной работе используется в двух аспектах: для изучения свойств и особенностей поведения микрочастиц, и для исследования транспорта микропластика в Балтийском море. При этом используются открытые данные службы Европейского центра мониторинга и прогноза состояния океана (ECOMF: MyOcean, MyOcean2), конфигурация модели NEMO для Балтийского моря и оригинальный дополнительный блок транспорта частиц. Ядром моделей является численная нелинейная 3D модель циркуляции океана NEMO <http://www.nemo-ocean.eu>. Она основана на системе примитивных уравнений гидротермодинамики в приближении Буссинеска, гидростатики и

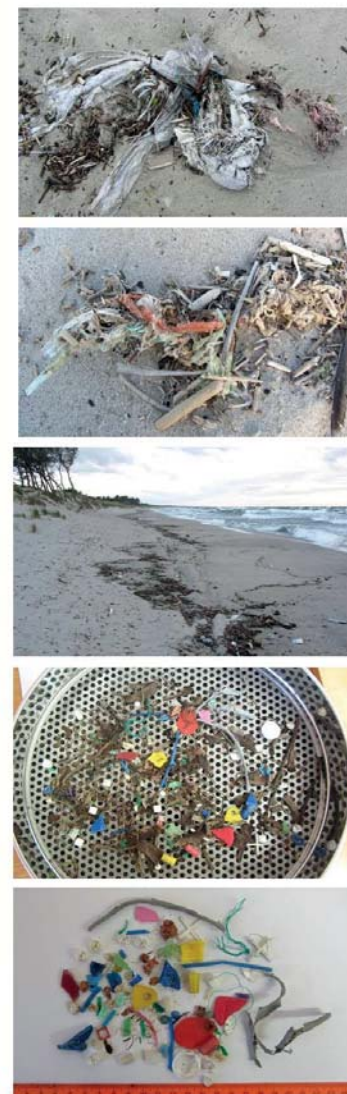
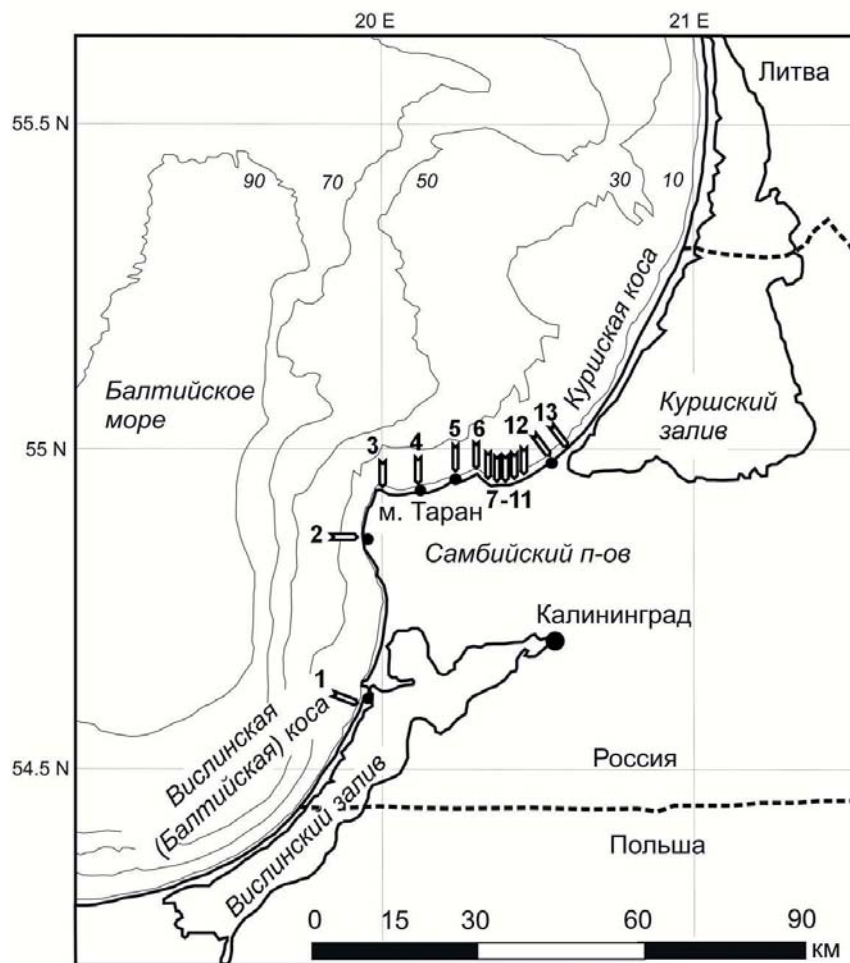


Рис. 1. Места отбора проб вдоль побережья Балтийского моря (Калининградская область, Россия). Районы: 1 — Балтийская коса (пос. Коса), 2 — пос. Янтарный, 3 — м. Таран, 4 — г. Светлогорск, 5 — г. Пионерский, 6 — м. Гвардейский, 7 — пос. Заостровье, 8 — игровая зона «Янтарная», 9 — пос. Куликово, 10 — ветропарк, 11 — пос. Рошино, 12 — г. Зеленоградск, 13 — корень Куршской косы. На правой панели — примеры образцов пластика на пляже в штормовом заплеске и собранного макро/мезо/микропластика.

несжимаемости жидкости. Формула UNESCO используется в качестве уравнения состояния морской воды. Для области исследования топография дна с разрешением 1×1 км была построена на основе открытого цифрового массива Института исследований Балтийского моря в Варнемюнде (IOW) <http://www.io-warnemuende.de/topography-of-the-baltic-sea.html>. Бухты и заливы не учитывались. Дискретизация системы уравнений в модели выполняется на сетке «С» по терминологии Аракавы [31]. Конечно-разностная аппроксимация уравнений движения выполнена с применением схемы с сохранением энергии и энтропии. Для нелинейных слагаемых в уравнениях пере-

носа — диффузии тепла и соли используется TVD схема [44]. Горизонтальный турбулентный обмен для диффузии тепла и соли в тестовом расчете был параметризован через бигармонический оператор (с коэффициентом $5 \times 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$). Внешнее атмосферное воздействие было получено из базы данных <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>. Шаг по времени в модели составляет 1,5 минуты. Для дискретизации по вертикали используются 19 z-горизонтов с шагом порядка 3 м в верхнем 30-метровом слое. Начальные и граничные условия были получены из реанализа 5×5 км гидродинамики Балтийского моря, выполненного проектом Copernicus



Рис. 2. Образцы микро/мезо пластика: А) промышленные пеллеты, Б) гранулы, В) фрагменты (лом), пеллеты, вспененный пластик (шарики пенопласта), Г) фрагменты (лом), Д) синтетические нити, Е) плёнки, Ж) вспененный пластик (деградировавшие шарики пенопласта), З) вспененный пластик (пенополистирол)

<http://marine.copernicus.eu>. При моделировании учитываются только температура и соленость из реанализа Copernicus посредством релаксации к значениям из крупномасштабного расчета. Для параметризации вертикального перемешивания была выбрана $k-\omega$ модель турбулентности, которая также использовалась при проведении реанализа Copernicus (рис. 3Б).

При разработке модели лагранжева переноса частиц (MARBLE) исходная конфигурация модели TRACPY была изменена следующим образом: изменения коснулись модулей считывания и вывода данных (для приспособления к работе с различными результатами гидродинамических расчетов); дополнительные процедуры и функции были созданы для учета вертикального движения частичек, для учета типа частиц, для задания регулярных вбросов новых частиц, а также для задания формы и положения начальных полей микропластика. Для удобства выбора варианта расчета и задания входных параметров расчета используется внешний файл с конфигурацией и текстовый интерфейс для выбора модуля, отвечающего за определенный тип микропластика. Таким образом, модулем переноса является программа на языке программирования Python, которая, в зависимости от выбранного пользователем типа микропластика, считывает входные параметры расчета (количество частиц, дата и место/места выброса), поля течений и ветра, параметры турбулентной диффузии и др. К настоящему времени, реализованы модули для трех типов микропластика: легких нитей (microfibres), сфероидных частичек с положительной плавучестью и частиц с нейтральной плавучестью (общий случай). В каждом из модулей используется

свой набор специальных подпрограмм. Так, для нитей это подпрограммы вертикального переноса и вычисление условий осаждения на дне [6]; для легкого пластика это учет силы и направления ветра. Разработанная модель лагранжева переноса частиц (MARBLE) в Балтийском море в контексте данной работы использовалась для численного исследования путей распространения лёгкого микропластика для Гданьского залива (Bay of Gdansk — BoG) в ЮВБ со стартовым положением частиц в BoG (рис. 3А). Расчеты длительностью в один год с последовательно растущим на порядок количеством частиц (100, 1000, 10 тыс., 100 тыс.) для района BoG на конфигурации Intel Core i5 с 16 Гб RAM показал, что 100 частиц явно недостаточно, чтобы судить о финальном распределении, но вполне достаточно 10 тысяч частиц. Разработаны подпрограммы, учитывающие влияние ветрового воздействия (парусности — «windage») на лёгкие частицы микропластика. Исследования [14, 35] показали необходимость такого подхода. «Коэффициент парусности» (k) варьировался от 0,03 до 0,001. Диаграммы повторяемости направления и силы ветра в области ЮВБ для 2007 года (за 4 сезона) приведены на рисунке 3В по данным реанализа, использованного в качестве граничных условий в расчетах гидродинамики по модели NEMO и переноса микропластика по модели MARBLE. Среди доступных данных реанализа атмосферы, данные по ветру за 2007 год были выбраны как наименее отличающиеся от среднемноголетних наблюдений: это год без исключительных метеорологических ситуаций, что позволяет рассматривать результаты расчетов как типичные [2].

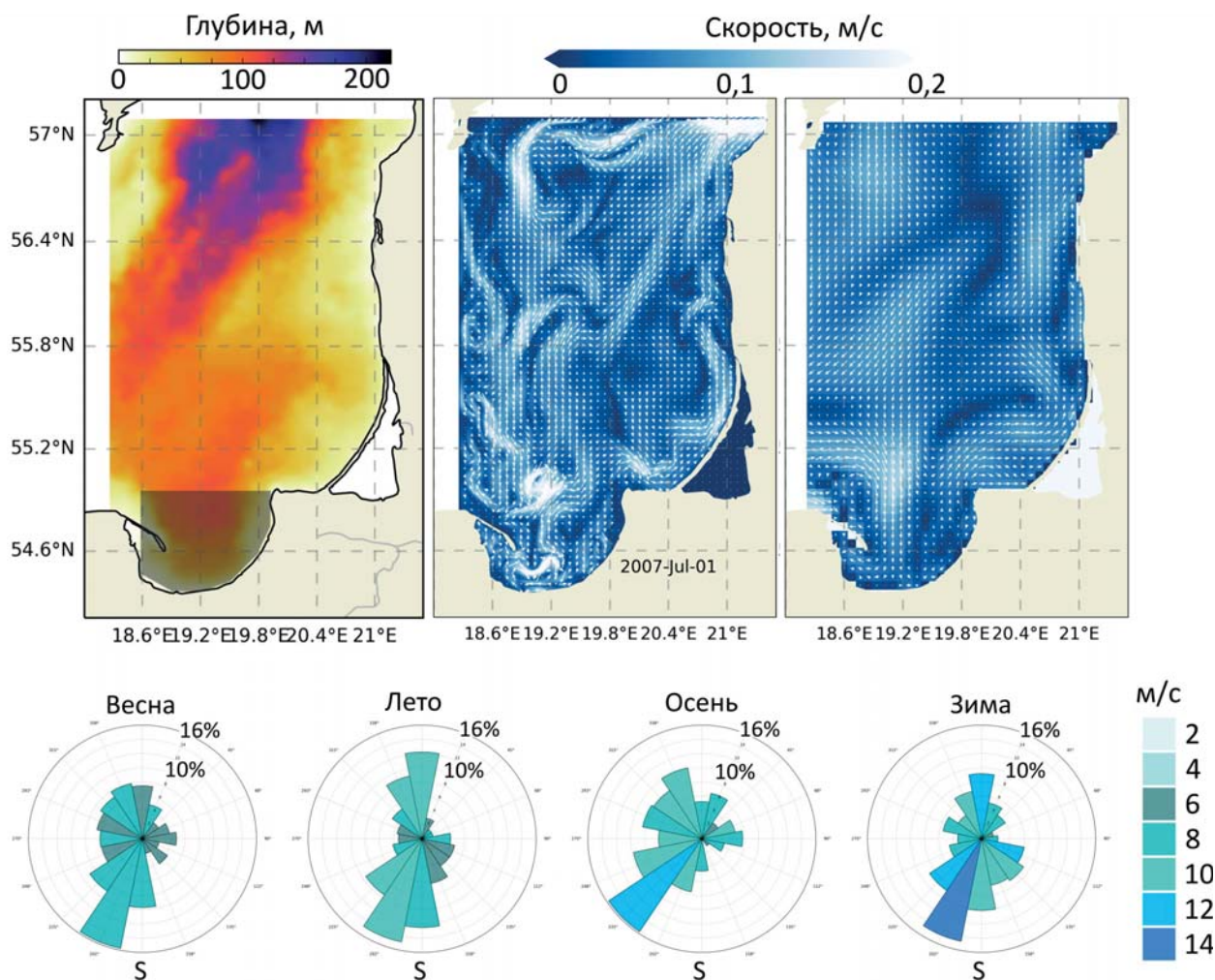


Рис. 3. А) Топография региональной конфигурации ЮВБ с разрешением 1 км и стартовое положение частиц в Гданьском заливе (BoG) (чёрный прямоугольник), на котором распределялся начальный выброс микропластика в тестовых расчетах; Б) интенсивность и направление поверхностных течений по результатам численного моделирования с высоким пространственным разрешением (слева) и по результатам реанализа (справа); В) диаграммы повторяемости направления и силы ветра в области ЮВБ по данным реанализа (цветом показана интенсивность ветра третьего квартала; высота сектора отвечает процентам повторяемости ветра соответствующего румба).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведён анализ образцов с пляжей Калининградского побережья (рис. 1) с различной антропогенной нагрузкой (образцы, собранные на линиях штормовых заплесков). Анализ показал следующий качественный и количественный состав микропластика (по убыванию): вспененный пластик (пенопласт и пенополистирол) в среднем $234,1 \pm 176,9$ частиц/м² (рис. 4), фрагменты пластика (лом) $20,8 \pm 15,8$ частиц/м², синтетические нити $18,7 \pm 8,6$ частиц/м², пластиковые плёнки $10,5 \pm 6,1$ частиц/м², пеллеты $7,6 \pm 7,1$ частиц/м², гранулы $1,7 \pm 2,3$ частиц/м². В среднем, следующие значения могут охарактеризовать загрязненность Калининградских пляжей микропластиком: 0,05–2,89 мг на грамм сухого

образца (или 370–7330 мг/м² / 42–1150 частиц/м² / 1,3–36,3 частиц/кг), с минимальными/максимальными значениями $80 \cdot 10^{-3}$ –8,38 мг на грамм сухого образца (или 67–16 000 мг/м² / 7–5560 частиц/м² / 0,2–175,3 частиц/кг). Результаты более подробного анализа представлены в статье [17].

Распределение (в среднем) лёгкого «плавающего» пластика (вспененный пластик — пенопласт и пенополистирол, синтетические нити и плёнки) на пляжах вдоль Калининградского побережья (от точки 1 до точки 2, согласно карте на рис. 1) представлено на рисунке 4. Повышенное содержание вспененного пластика выявлено в образцах из мест отбора на северном побережье Самбийского п-ова: за мысом Таран, на мысе Гвардейском, в районе пос. Заостровье, игровой зоны «Янтарная» и в районе г. Зеленоградска (не-

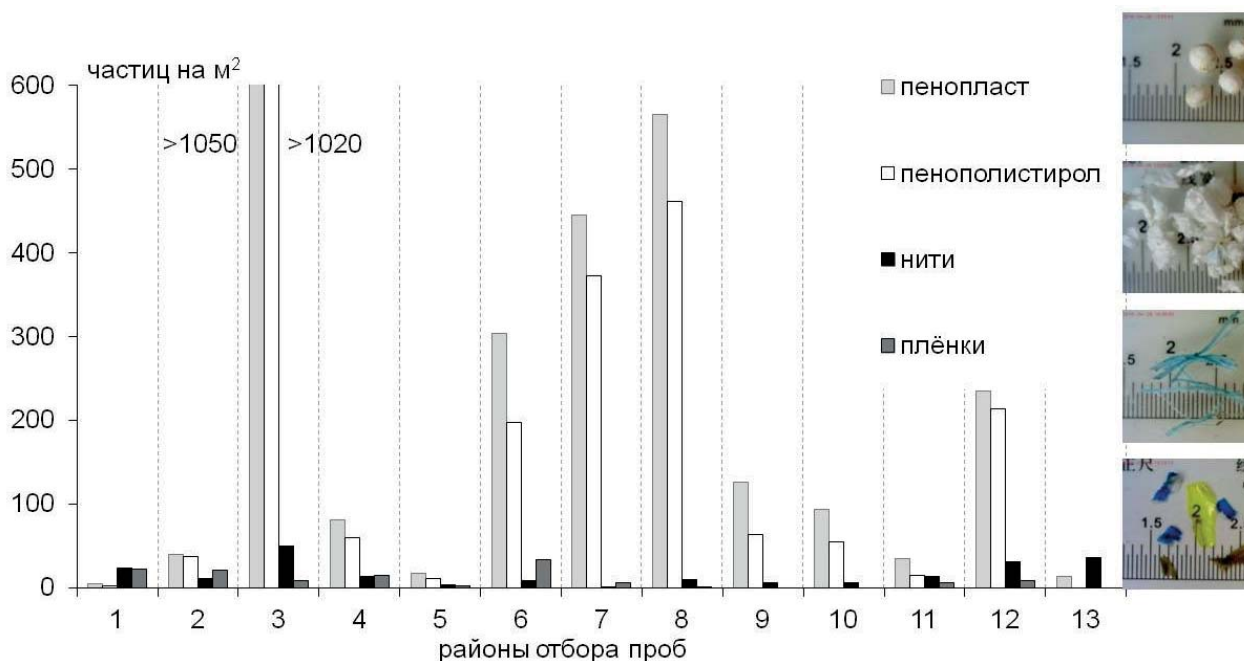


Рис. 4. Распределение различных видов лёгкого микропластика (вспененный пластик — пенопласт и пенополистирол, синтетические нити и плёнки) вдоль побережья (от точки 1 до точки 13, согласно карте на рис. 1) (в среднем частиц на м²).

далеко от корня Куршской косы), т. е. в районах со сложной системой течений и вихрей вдоль побережья [5, 26], что хорошо было проиллюстрировано результатами моделирования (рис. 3Б).

Для нитей и плёнок не всё так однозначно, но присутствие нитей отмечено повсеместно, и преимущественно – на Балтийской косе (у пос. Коса), на северном побережье Самбийского п-ова за мысом Таран, в г. Зеленоградске и у корня Куршской косы. Плёнки отмечены преимущественно на Балтийской косе, на западном побережье Самбийского п-ова у пос. Янтарный, на северном побережье Самбийского п-ова у г. Светлогорска, на мысе Гвардейском (см. рис. 4). Это говорит, во-первых, о разнообразии форм и плотностей плавучих частиц, их способности «контактировать» с другими объектами (цепляться и запутываться, например, в плавающих водорослях), быстрее подвергаться биообрастанию и т. д. Во-вторых, самый лёгкий вспененный пластик, как наиболее «мобильный» и «управляемый» течениями и ветром, распространён повсеместно. Для данного анализа были взяты образцы в некоторый момент времени (например, после очередного шторма), так что сезонная и годовая динамика распределения пластиков не может быть рассмотрена. В дальнейшем, после проведения дополнительных анализов образцов, собранных в течение 2015–2017 гг., данные будут обобщены.

При моделировании для легких (плавучих) частиц, все время остающихся на поверхности моря, проведены серии численных экспериментов, позволившие оценить интенсивность распространения этих частиц из начальной области. Расчеты показали, что активная зимне-весенняя циркуляция способствует быстрому обновлению вод (т. е. очищению от загрязнения). Когда парусность частиц высокая ($k = 0,03$), они быстро попадают в прибрежную зону и остаются там надолго. Поскольку модель не имеет параметров для обмена между береговыми и морскими ячейками сетки (вероятность осаждения на берег), то это практически эквивалентно удалению частиц из дальнейшего моделирования. Когда парусность частиц на порядок ниже ($k = 0,001$), скорость их движения по поверхности увеличивается только на 5%. В этом случае большее количество частиц остается вдали от берега и, как правило, наиболее выражено перемещение частиц в северо-восточном направлении (рис. 5). На рисунке 5 цветные точки отвечают финальному положению 1000 частиц после 100 дней расчета, с начальным положением в ЮВБ.

Результаты расчётов с учётом парусности (особенно с коэффициентом $k = 0,03$, рис. 5 В) удовлетворительно описывают наблюдаемое на пляжах распределение лёгких вспененных пластиков в районе Калининградского побережья, особенно — в районе северного побережья Сам-

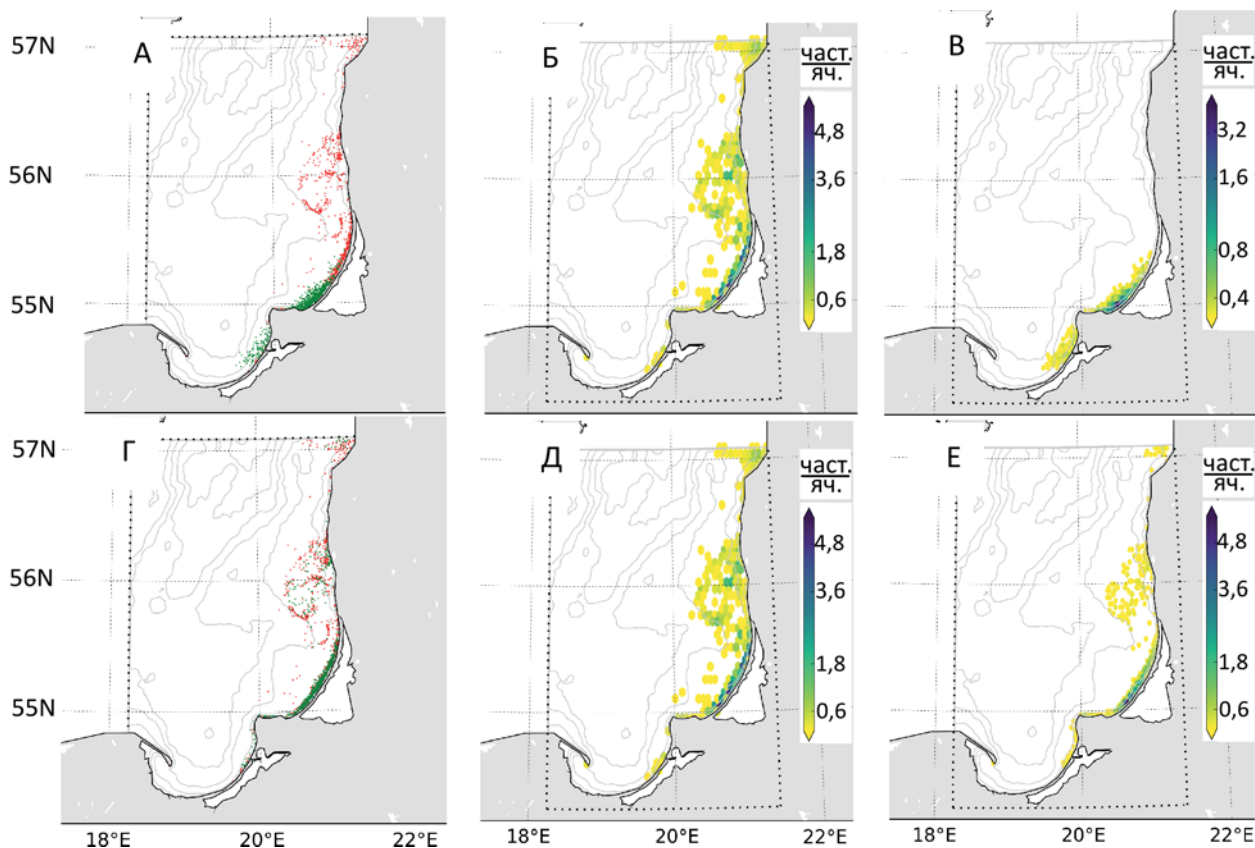


Рис. 5. А, Г — Цветные точки отвечают финальному положению 1000 частиц после 100 дней расчета, с начальным положением в ВоГ. Зеленые — с учетом парусности, красные — без учета. Б, Д — гистограмма финального распределения частиц без учета парусности; В, Е — с учетом. А, Б, В — коэффициент парусности $k = 0,03$; Г, Д, Е — коэффициент парусности $k = 0,001$. Показан контур подласти, в которой проводился расчет гидродинамических параметров морской среды с увеличенным горизонтальным разрешением (1 км).

бийского п-ова — от мыса Гвардейский до корня Куршской косы. При коэффициенте $k = 0,001$ (рис. 5Е) получаем более равномерное распределение вспененного пластика вдоль всего побережья, но с повышенным выбросом в районах на северном побережье Самбийского п-ова за мысом Таран, в г. Зеленоградске и у корня Куршской косы, что хорошо коррелирует с наблюдаемым распределением как лёгких вспененных частиц, так и синтетических нитей на пляжах (см. рис. 4). Кроме всего, мы получаем дополнительную информацию о вероятных местах скопления пластиковых частиц и ниточек на берегу, что, однако, требует проверки. Например, моделирование указывает на вероятные места скопления пластика в районе Куршской косы, особенно от корня косы до Российско-Литовской границы.

Существующий код модели позволяет выполнять оценки не только для запуска частиц из поверхностного слоя, но и для всех подповерхностных слоев. Анализ данных Sorpenicus показал, что в них скорости течений (а, следовательно, и активность переноса частиц) в при-

брежной зоне существенно недооценивается. В результатах моделирования за счет увеличения пространственного разрешения проявляется значительно больше вихрей и струйных течений, а их интенсивность значительно выше, что было одной из целей проведения расчета с улучшенным разрешением. Таким образом, расчеты переноса частиц по модели MARBLE на основе течений, полученных при моделировании на модели NEMO, позволяют получить более точные поля распределения осевших частиц и выявить зоны конвергенции, связанные с особенностями береговой черты. Однако, при расчетах с учетом специфической плотности частиц микропластика необходима дополнительная настройка: а) параметров вертикального перемешивания; б) критериев обмена частицами с берегом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ показал, что все обследованные пляжи были загрязнены пластиком, а парафин и янтарь были частыми сопутствующими ком-

понентами. Тем не менее, сравнение с пляжами по всему миру показывает, что пляжи Калининградской области достаточно чистые. Следующий важный вывод: нет очевидного различия в загрязненности пляжей с высокой и низкой антропогенной нагрузкой — и пластиковый мусор есть везде, что говорит о большом влиянии течений и ветровой нагрузки (особенно штормовых эпизодов) на транспорт пластика в прибрежной зоне. Результаты более детального анализа данных мониторинга пляжей представлены в статье [17].

Разработана модель переноса микропластика MARBLE для изучения путей перемещения лёгких и плавающих на поверхности моря микропластиков. Модель способна учитывать реальную атмосферную и гидродинамическую ситуацию в Юго-Восточной Балтике. Благодаря более высокому горизонтальному разрешению по сравнению с данными реанализа Copernicus, результаты моделирования показывают гораздо больше вихрей и интенсивных струй. Исследована чувствительность конечного распределения микропластика к коэффициентам ветрового воздействия (парусности). Форма и плотность микропластиков в морской среде имеют решающее

значение для определения их свойств парусности и перемещения.

Сравнительный анализ результатов моделирования на разработанной модели переноса микропластика MARBLE с результатами наблюдений, проведёнными на пляжах Калининградской области показал, что результаты расчётов с учётом парусности вполне удовлетворительно описывают выброс лёгких частиц микропластика и ниточек на пляжи Калининградской области, с повышенным выбросом в районах на северном побережье Самбийского п-ова за мысом Таран, в г. Зеленоградске и у корня Куршской косы, что хорошо коррелирует с наблюдаемым распределением как лёгких вспененных частиц, так и синтетических нитей на пляжах. Дополнительно получена информация о вероятных местах выброса и скопления пластиковых частиц и ниточек на берегу, что требует дополнительной проверки.

Таким образом, разработан удобный и перспективный инструмент для изучения особенностей поведения нескольких типов микропластика в условиях Балтийского моря. Подтверждена исключительная важность учета парусности для самых легких частиц микропластика, которые выступают над поверхностью моря, для предсказания путей их переноса.

Благодарности

Исследования проводятся при поддержке гранта РФФИ № 15-17-10020. Выражаем благодарность за помощь в проведении береговых экспедиций Есюкову О. В.

Литература

1. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
2. Дубравин В. Ф. Эволюция гидрометеорологических полей в Балтийском море. Калининград: Капрос. 2014. 438 с.
3. Andrady A. L. Microplastics in the marine environment / Mar. Pollut. Bull. 2011. Vol. 62. № 8. P. 1596–1605.
4. Arthur C., Baker J., Bamford H. Proceedings of the international research workshop on the occurrence, effects and fate of microplastic marine debris. In: NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-30. 2009. 49 pp.
5. Babakov A. Wind-driven currents and their impact on the morpho-lithology at the eastern shore of the Gulf of Gdańsk / Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. 2010. Vol. 57. № 2. P. 85–104.
6. Bagaev A., Mazyuk A., Khatmullina L., Isachenko I., Chubarenko I. Anthropogenic fibres in the Baltic Sea water column: Field data, laboratory and numerical testing of their motion / Sci. Total Environ. 2017. Vol. 599–600. P. 560–571.
7. Barnes D. K. A., Galgani F., Thompson R. C., Barlaz M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments / Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci. 2009. Vol. 364. P. 1985–1998.
8. Boerger C. M., Lattin G. L., Moore S. L., Moore C. J. Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre / Mar. Pollut. Bull. 2010. Vol. 60. P. 2275–2278.
9. Chubarenko I., Bagaiev A., Zobkov M., Esiukova E. On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment / Mar. Pollut. Bull. 2016. Vol. 108. P. 105–112.
10. Chubarenko I., Stepanova N. Microplastics in sea coastal zone: Lessons learned from the Baltic amber / Environ. Pollut. 2017. Vol. 224. P. 243–254.
11. Cole M., Lindeque P., Halsband C., Galloway S. C. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review / Mar. Pollut. Bull. 2010. Vol. 62. P. 2588–2597.
12. Cole M., Webb H., Lindeque P. K., Fileman E. S., Halsband C., Galloway T. S. Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms / Sci. Rep. 2014. 4:4528.

13. Cooper D. A. Effects of Chemical and Mechanical Weathering Processes on the Degradation of Plastic Debris on Marine Beaches / Electronic Thesis and Dissertation Repository. 2012. Paper 371. 219 pp.
14. De Dominicis M., Bruciaferri D., Gerin R., Pinardi N., Poulain P. M., Garreau P., Zodiatis G., Perivoliotis L., Fazioli L., Sorgente R., Manganiello C. A multi-model assessment of the impact of currents, waves and wind in modelling surface drifters and oil spill / Deep-sea Research Part II-topical Studies In Oceanography. 2016. Vol.133. P. 21–38.
15. Duis K., Coors A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects / Environ. Sci. Eur. 2016. 28:2
16. Eriksen M., Lebreton L. C. M., Carson H. S., Thiel M., Moore C. J., Borerro J. C., et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea / PLoS ONE. 2014. Vol. 9(12): e111913.
17. Esiukova E. Plastic pollution on the Baltic beaches of the Kaliningrad region, Russia / Mar. Pollut. Bull. 2017. Vol.114. P. 1072–1080.
18. Galgani F., Hanke G., Werner S., De Vrees L. Marine litter within the European Marine strategy framework directive / ICES J. Mar. Sci. 2013. Vol. 70. P. 1055–1064.
19. GESAMP (2015). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment (Kershaw P. J. (eds.). IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. Rep. Stud. GESAMP No. 90, 2015. 96 pp.
20. Gregory M. R. Environmental implications of plastic debris in marine settings — entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions / Philos. Trans. R. Soc., B. 2009. Vol. 364. P. 2013–2025.
21. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R. C., Thiel M. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification / Environ. Sci. Technol. 2012. Vol. 46. P. 3060–3075.
22. Hirai H., Takada H., Ogata Y., Yamashita R., Mizukawa K., Saha M., Kwan C., Moore C., Gray H., Laursen D., Zettler E. R., Farrington J. W., Reddy C. M., Peacock E. E., Ward M. W. Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches / Mar. Pollut. Bull. 2011. Vol. 62. P. 1683–1692.
23. Hopewell J., Dvorak R., Kosior E. Plastics recycling: challenges and opportunities / Phil. Trans. R. Soc. B. 2009. Vol. 364. P. 2115–2126.
24. Ivar do Sul J. A., Costa M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment / Environ. Pollut. 2014. Vol. 185. P. 352–364.
25. Khatmullina L., Isachenko I. Settling velocity of microplastic particles of regular shapes / Mar. Pollut. Bull. 2017. Vol. 114. P. 871–880.
26. Krek A., Stont Zh., Ulyanova M. Alongshore bed load transport in the southeastern part of the Baltic Sea under changing hydrometeorological conditions: Recent decadal data / Regional Studies in Marine Science. 2016. Vol. 7. P. 81–87.
27. Łabuz T. A. Environmental Impacts — Coastal Erosion and Coastline Changes / Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin, Regional Climate Studies: In: The BACC II Author Team (Eds.). Springer, Berlin. 2015. P. 381–396.
28. Law K. L. Plastics in the Marine Environment / Annu. Rev. Mar. Sci. 2017. Vol. 9. P. 205–229.
29. Marine Anthropogenic Litter / Bergmann M., Gutow L., Klages M. (Eds.). Springer, 2015. 447 pp.
30. Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters sand sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48. 2015. 31 pp.
31. Mesinger F., Arakawa A. Numerical methods used in atmospheric models. GARP Publ. Ser. No. 17. 1976. 64 pp.
32. Muthukumar A., Veerappillai S. Biodegradation of Plastics — A Brief Review / Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res. 2015. Vol. 31(2), No. 36. P. 204–209.
33. Napper I. E., Bakir A., Rowland S. J., Thompson R. C. Characterisation, quantity and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics / Mar. Pollut. Bull. 2015. Vol. 99. № 1–2. P. 178–185.
34. Plastics Europe (2015): Plastics - the Facts 2014/15: An analysis of European latest plastics production, demand and waste data / EuPC. Brussels, Belgium. 2015. 33 pp.
35. Poulain P. M., Gerin R., Mauri E., Pennel R. Wind Effects on Drogued and Undrogued Drifters in the Eastern Mediterranean / J. Atmos. Oceanic Technol. 2009. Vol. 26. 1144–1156.
36. Rocha-Santos T., Duarte A. C. A critical overview of the analytical approaches to the occurrence, the fate and the behavior of microplastics in the environment / Trends in Analytical Chemistry. 2015. Vol. 65. P. 47–53.
37. Rodríguez-Seijo A., Pereira R. Morphological and Physical Characterization of Microplastics / Comprehensive Analytical Chemistry. 2017. Vol. 75. P. 49–66.
38. Shah A. A., Hasan F., Hameed A., Ahmed S. Biological degradation of plastic: a comprehensive review / Biotechnology Advances. 2008. Vol. 26. P. 246–265.
39. State of the coast of South East Baltic: an indicators-based approach to evaluating sustainable development in the coastal zone of the South East Baltic Sea / Gilbert C. (Eds.). Drukaria WL, Gdansk. 2008. 162 pp.
40. The Baltic Sea Basin / Harff J., Björck S., Hoth P. (Eds.). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2011. 449 pp.
41. UNEP (2016). Marine plastic debris and microplastics – Global lessons and research to inspire action and guide policy change. United Nations Environment Programme, Nairobi. 2016. 252 pp.
42. Van Cauwenberghe L., Devriese L., Galgani F., Robbins J., Janssen C. R. Microplastics in sediments: A review of techniques, occurrence and effects / Mar. Environ. Res. 2015. Vol. 111. P. 5–17.
43. Wright S. L., Thompson R. C., Galloway T. S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review / Environ. Pollut. 2013. Vol. 178. P. 483–492.

44. Zalesak S. T. Fully multidimensional flux corrected transport for fluids / J. Comput. Phys. 1979. Vol. 31. P. 335–362.

45. Zobkov M., Esiukova E. Microplastics in Baltic Bottom Sediments: quantification procedures and first results / Mar. Pollut. Bull. 2017. Vol. 114 (2). P. 724–732.

Краткая информация об авторах:

Есюкова Елена Евгеньевна, к. г. н.

Старший научный сотрудник, лаборатория физики моря.

Специализация: Экологически важные вопросы морского транспорта и осадения морского микропластика на пляжах юго-восточной Балтики

E-mail: elena_esiukova@mail.ru

Esiukova E. E., PhD (Geogr.)

Senior Researcher, Laboratory for Marine Physics

Area of expertise: Participates in data collection of micro/meso/macroplastics samples, performs a cameral treatment, analyzes the qualitative and quantitative composition of the microplastics, and assesses the anthropogenic contamination of sandy beaches.

E-mail: elena_esiukova@mail.ru

Багаев Андрей Владимирович, к.ф.-м.н.

Старший научный сотрудник, лаборатория физики моря.

Специализация: Экологически важные вопросы морского транспорта и осадения морского микропластика на пляжах юго-восточной Балтики

E-mail: a.bagaev1984@gmail.com

Bagaev A. V., PhD (Phys.-Math.)

Senior Researcher, Laboratory for Marine Physics

Area of expertise: Develops and implements an integrated unit for the numerical model aimed at analysis of microplastics migration, performs computational analysis, participates in data collection of micro plastics samples.

E-mail: a.bagaev1984@gmail.com

Мизюк Артём Игоревич, к.ф.-м.н.

Научный сотрудник, лаборатория физики моря.

Специализация: Экологически важные вопросы морского транспорта и осадения морского микропластика на пляжах юго-восточной Балтики.

E-mail: artem.mizyuk@gmail.com

Mizyuk A. I., PhD (Phys.-Math.)

Researcher, Laboratory for Marine Physics

Area of expertise: Develops and implements an integrated unit for the numerical model aimed at analysis of microplastics migration, performs statistics and reanalysis with NEMO.

E-mail: artem.mizyuk@gmail.com

Чубаренко Ирина Петровна, д.ф.-м.н.

Заведующая лаборатории физики моря.

Специализация: Экологически важные вопросы морского транспорта и осадения морского микропластика на пляжах юго-восточной Балтики

E-mail: irina_chubarenko@mail.ru

Chubarenko I. P., DSc (Phys.-Math.)

Head of Laboratory for Marine Physics

Area of expertise: Develops and implements the research program; co-ordinates efforts in field, cameral, laboratory, and numerical work; plans, organizes, and participates in data sampling and laboratory experiments.

E-mail: irina_chubarenko@mail.ru