

Е. С. Бубнова

**ВЗВЕШЕННОЕ ВЕЩЕСТВО В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ
КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ:
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, ТРАНСПОРТ, СОСТАВ**

32

Береговая зона Калининградской области представляет собой уязвимый участок побережья, поскольку включает как зоны рекреации и всемирного природного наследия, так и районы, где ведется активное строительство; как зоны абразии, так и аккумуляции. Поэтому она нуждается в геоэкологическом мониторинге и контроле основных экологических показателей, включая концентрацию взвешенных частиц. Взвесь – один из ключевых параметров оценки состояния морской среды и транспортный агент для загрязняющих веществ, способных адсорбироваться на поверхности частиц. Данное исследование посвящено транспорту взвешенных частиц из вогнутой части берега, включающей восточную часть Калининградского полуострова и корень Куришской косы – одного из крупнейших источников взвеси на побережье Калининградского полуострова. Было выявлено, что направления перемещения взвешенных частиц в поверхностном и придонном слое различаются. Трансформация состава взвеси по мере продвижения от Калининградского полуострова к Куришской косе была изучена с помощью сканирующей электронной микроскопии. В составе взвеси доминирует биогенная фракция, включающая колонии сине-зеленых бактерий, диатомовых водорослей и динофлагеллят. Количество минеральных зерен в береговой зоне Куришской косы меньше, чем в береговой зоне Калининградского полуострова, однако процент зерен с высоким содержанием железа выше.

The coastal zone of the Kaliningrad region is an especially sensitive marine area which includes recreation areas, natural heritage sites, construction sites and zones of both abrasion and accumulation. Thus, it requires monitoring and control of core environmental indicators such as suspended particulate matter concentration. The research focused on the suspended matter transport from the main source area, which included both human-made and natural suspended matter inputs. Directions of particles transport for surface and bottom layer were discovered to be different. The transformation of the suspended matter transport from the Kaliningrad lagoon to the Curonian spit was studied with electron microscopy. The biogenic fraction dominates in the suspensions, including colonies of cyanobacteria, diatoms and dinoflagellates. The suspended matter composition changes from the Sambia Peninsula toward to the Curonian Spit: iron content rises along with a decrease in total number of mineral particles.

Ключевые слова: Балтийское море, взвешенное вещество, транспорт наносов, минеральный состав, абразия, аккумуляция, антропогенная деятельность.

Keywords: the Baltic Sea, suspended particulate matter, sediment transport, mineral composition, abrasion, deposition, human activity.



Введение

Основными источниками терригенного взвешенного вещества в береговой зоне Калининградской области являются абразия (до 1,8 млн т [2]) и вынос рек: Висла (1,8 млн т [13]), Преголя и Калининградский залив (0,32 млн т [17]). Дополнительным антропогенным источником взвешенного вещества является Калининградский янтарный комбинат, объемы сброса материала которого составляют 0,6–0,9 млн т в год [15]. Тем не менее в балансе осадочного вещества доминирует биогенный материал ввиду высокого уровня первичной продукции [11] (для всей Юго-Восточной Балтики 95 млн т [13]).

Долгое время считалось [3; 9], что у берегов Калининградской области существует единый вдольбереговой поток наносов, направленный в северном и северо-восточном направлениях. Более поздние исследования утверждали, что поток состоит из нескольких литодинамических звеньев и циркуляционных ячеек [1; 7]. В последние 20 лет многие труды придерживаются концепции циркуляционных ячеек [1; 10]. Однако самые последние исследования прибрежной литодинамики [20] подтверждают наличие единой литодинамической системы на северном побережье Калининградской области.

Береговая зона Балтийского моря в пределах Калининградской области на всем своем протяжении является рекреационной зоной. Кроме того, значительная ее часть относится к особо охраняемым природным территориям. Северное побережье представляет собой пример береговой зоны, включающей участки абразии, транзита и разгрузки осадочного материала. Несмотря на большое количество дефляционных котловин [4], Куршская коса остается самым крупным участком берега в регионе, где преобладают аккумулятивные процессы. Взвесь — один из ключевых параметров оценки состояния морской природной среды, в частности «взвешенные вещества» входят в перечень загрязняющих веществ, согласно распоряжению Правительства РФ [14]. Также взвесь — транспортный агент для загрязняющих веществ, способных адсорбироваться на поверхности частиц [12]. С этой точки зрения важным является изучение процессов переноса, трансформации и накопления взвешенных веществ [8].

Материалы и методы

Изучение взвешенного вещества было проведено по стандартным методикам с 2003 по 2018 г. в береговой зоне Калининградского (Самбийского) полуострова и Куршской косы. Отбор проб морской воды по двум горизонтам (придонный и поверхностный) осуществлялся ежемесячно с апреля по октябрь на шести основных точках (рис. 1) и ежегодно в летний период на четырех дополнительных (точки 14, 15, 18 и 23). Выделение взвешенного вещества производилось методом ультрафильтрации проб морской воды (объемом 1–3 л) под давлением 0,4 мбар. Использовались ядерные поликарбонатные фильтры производства Объединенного института ядерных исследований (Дубна) диаметром 47 мм и диаметром пор 0,4 мкм [13; 15].

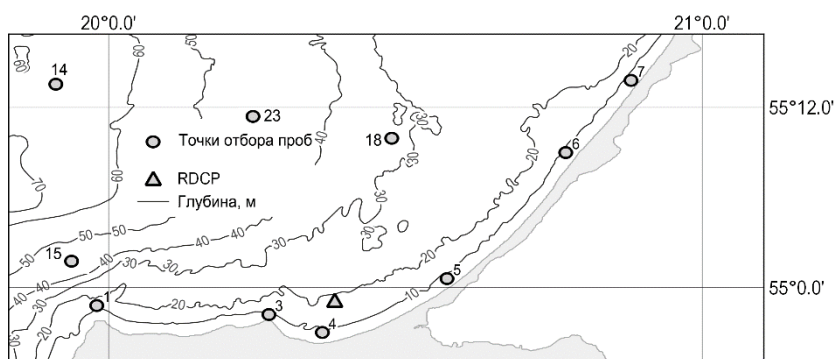


Рис. 1. Расположение точек отбора проб воды и постановки доплеровского профилографа скорости течений RDCP

Изучение вещественного состава полученных в летний период 2017–2018 гг. проб взвешенного вещества было произведено с помощью сканирующего электронного микроскопа *Quanta 250 Fei* (Центр исследования природы, Вильнюс). Образцы не полировались, покрывались слоем угля толщиной 15 нм и плотностью 2,25 д/см³.

Измерение скорости и направления течений в районе крупного источника взвешенного вещества (м. Гвардейский) было осуществлено с помощью автономного доплеровского профилографа скорости течений *Aanderaa RDCP 600* весной 2018 г. С 18.04 по 05.05.2018 г. прибор устанавливался на дно на глубине 19 м на в антивандальной пирамиде на расстоянии 0,6 м от грунта, с 07.05 по 30.05.2018 г. — в рамке на расстоянии 1,5 м от грунта.

Результаты и обсуждение

Среднемноголетнее (2003–2018) распределение взвешенного вещества в поверхностном и придонном слоях береговой зоны российского сектора юго-восточной части Балтийского моря (рис. 2) соответствует ранее опубликованным данным распределения взвеси во всем российском секторе Юго-Восточной Балтики за более короткие периоды [5; 16]. Максимальные значения среднемноголетней концентрации взвеси в поверхностном слое составляют около 3,0 мг/л в точке за м. Гвардейским, где располагаются сразу природный источник терригенной взвеси (абразионный участок берега), антропогенный источник терригенной взвеси (порт Пионерский в стадии строительства, терминал по приему сжиженного природного газа), антропогенный источник биогенной взвеси (выход сточных вод «Объединенных канализационных очистных сооружений») и природный источник биогенной взвеси (мелководная хорошо прогреваемая бухта). По мере удаления от точки с максимальными значениями концентрация взвеси уменьшается до 2,0 мг/л в береговой зоне и до еще меньших значений в открытом море [16].

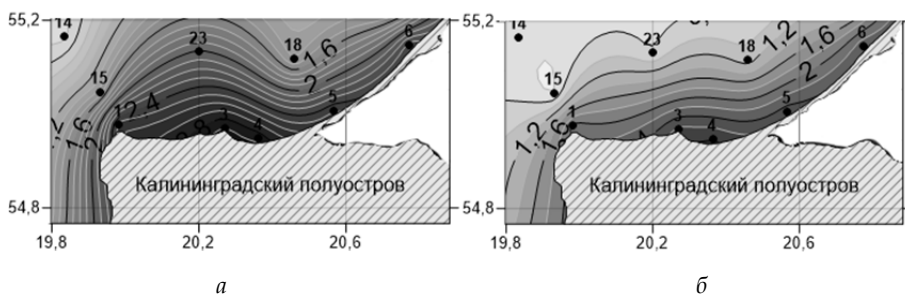


Рис. 2. Распределение взвешенного вещества в поверхностном (а) и придонном (б) слоях моря

Абсолютные значения концентрации взвешенного вещества в придонном слое ниже, чем на поверхности ввиду меньшего биопродуцирования взвеси. Тем не менее локализация максимальных значений в придонном и поверхностном слоях совпадает: максимум в прибрежной зоне также приурочен к востоку от м. Гвардейского и достигает 2,85 мг/л. У берегов национального парка «Куршская коса» значения уменьшаются до 2,3 и 2,1 мг/л по мере удаления от Калининградского полуострова (точки 6 и 7 соответственно).

Согласно данным RDCP, установленного в районе максимальных концентраций взвешенного вещества (западнее пос. Пионерского), доминирующие направления течений различались для поверхностного (рис. 3, а) и придонного (рис. 3, б) слоев. В поверхностном слое основное направление перемещения взвешенного вещества соответствовало существующим представлениям о вдольбереговом потоке наносов [20]: доминирующим направлением течения было юго-восточное. Вместе с этим для придонного слоя юго-восточное и южное направления перемещения взвеси имели минимальное значение, доли остальных направлений были распределены равномерно с небольшим перевесом в сторону северного, то есть выноса взвешенного вещества из береговой зоны моря в открытую часть.

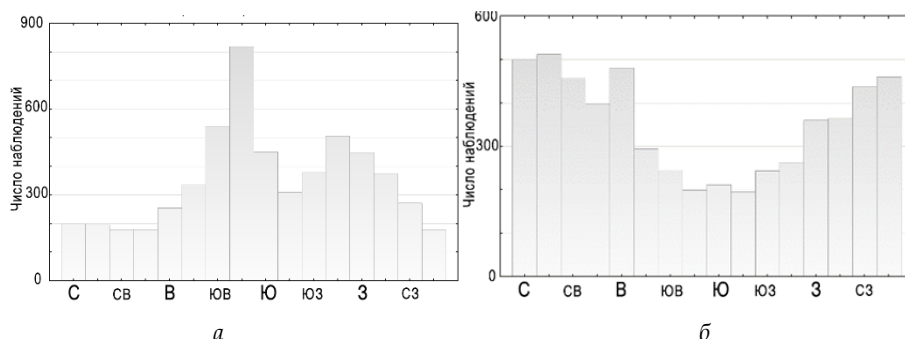


Рис. 3. Гистограмма направлений течений в поверхностном (а) и придонном (б) слоях в районе пос. Пионерского

По результатам сканирующей электронной микроскопии в минеральной фракции доминировали зерна кварца, полевых шпатов (орто-

клас и альбит) и глинистых минералов (иллит, смектит, монтмориллонит). Кроме того, были зафиксированы единичные частицы гедрита, гетита, доломита, амфибола, кальцита и пирита (рис. 4). Наибольшее количество минеральных зерен было обнаружено в пробах, полученных в береговой зоне Калининградского полуострова. Размеры частиц достигают 50 мкм, что не является исключительным для береговой зоны моря, где интенсивно идет ветро-волновое перемешивание. Пробы взвешенного вещества, отобранные у побережья Куршской косы, часто содержали большее количество железа.

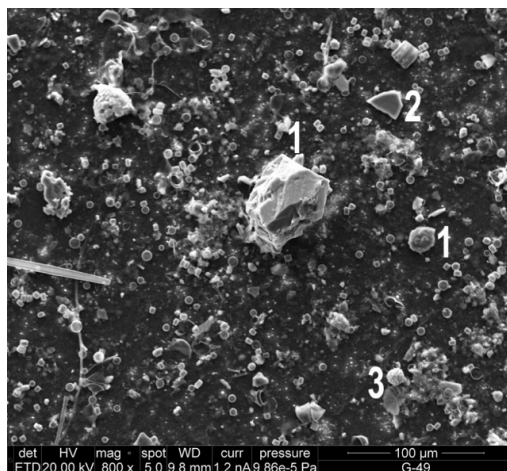


Рис. 4. Проба взвешенного вещества придонного слоя в районе Калининградского полуострова (точка 4):
1 – кварц; 2 – кальцит; 3 – фрамбоид пирита

Пробы взвеси, отобранные в июле 2017 и 2018 гг. (рис. 5, а), находятся под влиянием летнего максимума, вызванного развитием теплолюбивых сине-зеленых водорослей (*Nodularia spumigena*, *Aphanizomenon sp.* и др.) [6; 19]. Тем не менее на всех точках мониторинга в пробах присутствуют как целые, так и обломочные диатомовые водоросли и динофлагелляты (рис. 5, б), пик цветения которых приходится на апрель-май [21]. Видовую принадлежность организмов при отборе проб методом принудительной фильтрации с последующей сушкой определить не представляется возможным, поэтому организмы были определены до групповой принадлежности.

В пробах встречались как единичные минеральные зерна и микроорганизмы, так и различные агрегаты смешанного состава. В частности, были найдены пеллеты копепод, которые играют важную роль в переносе взвеси от поверхности в глубинные слои. Интересной особенностью многих проб было наличие динофитовых водорослей (динофлагеллят), обросших частицами (рис. 6) полевых шпатов (ортоклаза), амфиболов, кальцита и глинистых минералов с большим содержанием железа. Среди динофлагеллят существуют виды, создающие себе известковый скелет [18], в то время как создание скелета из других мине-



ралов было обнаружено впервые в данном регионе. Таким образом, данный феномен может иллюстрировать один из механизмов ускоренной седиментации минеральных зерен.

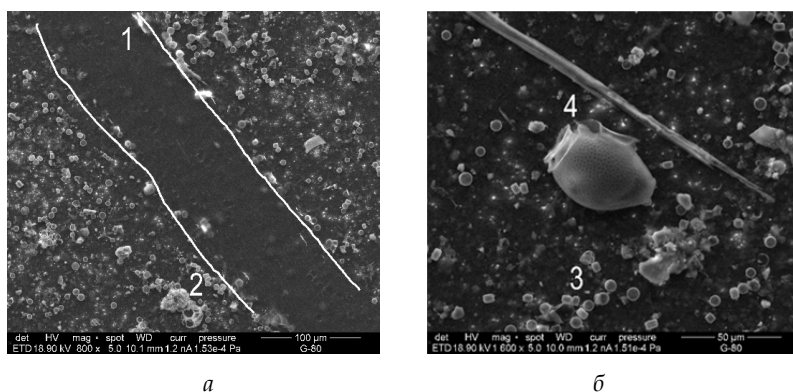


Рис. 5. Проба взвешенного вещества поверхностного слоя (корневая часть Куршской косы, точка 5):

- 1 – колония сине-зеленых бактерий; 2 – осколок диатомовой водоросли;
3 – диатомовые водоросли; 4 – динофитовая водоросль

У побережья Куршской косы в сравнении с береговой зоной Калининградского полуострова уменьшилось количество минеральных зерен и минеральных агрегатов, однако в их составе стало больше глинистых минералов с высоким содержанием железа, в связи с чем точная идентификация частиц оказалась затруднена. Источники железа во взвеси могут быть как естественными, так и антропогенными: размыв так называемой земли Кранта (богатый гидроокислами железа палеогеновый песчаник), судоходство, берегозащитные мероприятия.

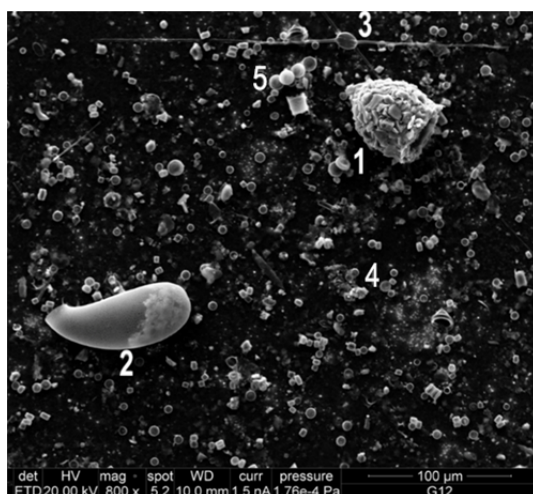


Рис. 6. Проба взвешенного вещества из поверхностного слоя (Светлогорск, точка 3):

- 1 – скопление частиц кварца и ортоклаза на скелете динофлагелляты;
2 – пеллета планктонных ракообразных; 3 – диатомовая водоросль;
4 – частица ортоклаза; 5 – скопление диатомовых водорослей



Заключение

Распределение взвешенного вещества в береговой зоне моря Калининградской области за 2003–2018 гг. соответствует циркумконтинентальной зональности с осложнениями, вызванными неравномерным распределением источников взвешенного вещества (естественных и антропогенных). Максимальные среднемноголетние концентрации взвеси (до 3 мг/л) — в вогнутой части берега на стыке Калининградского полуострова и Куршской косы, где наблюдается совместное действие нескольких источников взвешенного вещества (абразия, биопродуцирование, антропогенная деятельность).

Направление транспорта взвешенного вещества от основного источника на северном побережье Калининградской области различается для придонного и поверхностного слоев моря. В поверхностном слое генеральное направление перемещения взвешенных частиц соответствует направлению вдольберегового потока наносов — восточному и юго-восточному, в то время как для придонного слоя характерен больший вынос частиц в сторону открытой части моря.

В составе взвеси доминирует биогенная фракция, включающая колонии сине-зеленых бактерий, диатомовых водорослей и динофлагеллят. Среди минеральных зерен доминировали зерна кварца, полевых шпатов (ортоклаз и альбит) и глинистых минералов с высоким содержанием железа (количество зерен глинистых минералов в пробах растет от Калининградского полуострова к Куршской косе).

Сбор данных был выполнен в рамках госзадания ИО РАН (тема №0149-2019-0013). Работа с RDCP была осуществлена при поддержке гранта РФФИ №18-35-00656, изучение взвешенного вещества в береговой зоне Куршской косы было проведено при поддержке гранта РФФИ №19-45-393001. Изучение взвешенного вещества методом сканирующей электронной микроскопии осуществлялось в центре коллективного пользования Центра исследования природы (Nature Research Center) в Вильнюсе. Определение групповой принадлежности фитопланктона проведено благодаря заведующей Лаборатории морской экологии АО ИО РАН Елене Евгеньевне Ежовой.

Список литературы

1. Бабаков А. Н. Пространственно-временная структура течений и миграций наносов в береговой зоне юго-восточной Балтики (Самбийский п-ов и Куршская коса): дис. ... канд. геогр. наук. Калининград, 2003.
2. Блажчишин А. И. Баланс осадочного материала в Гданьском бассейне Балтийского моря // Литология и полезные ископаемые. 1984. №5. С. 67–76.
3. Бойнагрин В. Р. Динамика и морфология Самбийского полуострова // Океанология. 1966. Т. 6, вып. 3. С. 458–465.
4. Бурнашов Е. М., Карманов К. В. Дефляционные процессы на морском побережье Куршской косы // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. №45. С. 180–191.
5. Власова Т. Е., Бубнова Е. С. Распространение взвешенного осадочного вещества к северу от Калининградского полуострова // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2018. №3. С. 55–62.



6. *Евтушенко Н.В., Шеберстов С.В.* Использование данных спутникового сканера MODIS-Aqua для исследования циклов цветения фитопланктона в Балтийском море // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2016. Т. 13, №3. С. 114–124.

7. *Жиндарев Л.А., Хабидов А.Ш., Тризно А.К.* Динамика песчаных берегов морей и внутренних водоемов. Новосибирск, 1998.

8. *Израэль Ю.А., Цыбань А.В.* Антропогенная экология океана. Л., 1989.

9. *Кнапс Р.Я.* О методике определения характеристик движения наносов на бесприливных морях // *Науч. сообщ. института геол. и геогр. АН Лит. ССР.* Вильнюс, 1956. Т. 3. С. 141–143.

10. *Корзинин Д.В.* Морфодинамика абразионно-бухтового берега при волнениях разной интенсивности (на примере северного побережья Калининградского полуострова, ЮВ Балтика) // *Геоморфология.* 2016. №2. С. 41–50.

11. *Кудрявцева Е.А.* Первичная продукция фитопланктона // *Система Балтийского моря* / под ред. А.П. Лисицына. М., 2017. С. 214–241.

12. *Лебедев В.Л.* *Граничные поверхности в океане.* М., 1986.

13. *Лукашин В.Н., Кречик В.А., Кловиткин А.А. и др.* Речной сток и маргинальные фильтры рек // *Система Балтийского моря* / под ред. А.П. Лисицына. М., 2017. С. 189–214.

14. *Перечень* загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды : распоряжение правительства Рос. Федерации от 8 июня 2015 г. №1316-р. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102551626&backlink=1&&nid=102375372> (дата обращения: 15.01.2020).

15. *Сивков В.В.* Водная взвесь // *Нефть и окружающая среда Калининградской области.* Т. II : Море / под ред. В.В. Сивкова. Калининград, 2012. С. 120–128.

16. *Bukanova T., Kopelevich O., Vazyulya S. et al.* Suspended matter distribution in the south-eastern Baltic Sea from satellite and in situ data // *International Journal of Remote Sensing.* 2018. P. 1–22. doi: 10.1080/01431161.2018.1519290.

17. *Chubarenko B.* The Vistula Lagoon. In *Transboundary Waters and Basins in the South-East Baltic.* Kaliningrad, 2008. P. 37–57.

18. *Hildebrand-Habel T., Willems H.* New calcareous dinoflagellates (Calciodinelloideae) from the Middle Coniacian to Upper Santonian chalks of Lägerdorf (northern Germany) // *Journal of Micropalaeontology.* 2014. Vol. 23. P. 181–190. doi: <https://doi.org/10.1144/jm.23.2.181>.

19. *Kahru M., Elmgren R.* Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea // *Biogeosciences.* 2014. Vol. 11. P. 3619–3633.

20. *Krek A., Stont Zh., Ulyanova M.* Alongshore bed load transport in the south-eastern part of the Baltic Sea under changing hydrometeorological conditions: Recent decadal data // *Regional Studies in Marine Science.* 2016. P. 81–87. doi: 10.1016/j.rsma.2016.05.011.

21. *Thamm R., Schernewski G., Wasmund N., Neumann T.* Spatial phytoplankton pattern in the Baltic Sea. *Coastline Reports* // *Baltic Sea Typology.* 2004. Vol. 4. P. 85–109.

Об авторе

Екатерина Сергеевна Бубнова – мл. науч. сотр., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия.

E-mail: bubnova.kat@gmail.com

The author

Ekaterina S. Bubnova, Junior Research Fellow, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: bubnova.kat@gmail.com