

УДК 551.311.3:551.510 (261.24)

**ПОТОКИ ВЕЩЕСТВА ИЗ АТМОСФЕРЫ В БЕРЕГОВУЮ ЗОНУ  
ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ****Топчая В.Ю., Чечко В.А.***Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: piwis@mail.ru*

Представлены результаты натурных многолетних (2005–2015 гг.) исследований потоков вещества из атмосферы в береговую зону юго-восточной части Балтийского моря. Исследования включали сбор и изучение снега, собранного на ледяном покрове Вислинского и Куршского заливов, дождевой воды, а также проб атмосферного материала, поступающего в береговую зону в сухую погоду («сухое осаждение»). Всего на десяти станциях была собрана и исследована 191 проба взвешенного в атмосфере вещества, осевшего различными способами на территорию береговой зоны. Установлено, что невысокие значения потоков – от 1,0 до 4,5 мг/м<sup>2</sup>/сутки (в среднем 2,4 мг/м<sup>2</sup>/сутки) характерны для зимнего сезона, когда взвешенные в воздухе частицы накапливаются в снеговом покрове в результате гравитационного осаждения или выпадения с атмосферными осадками в виде снега. Наибольшие значения потоков (в среднем 66,5 мг/м<sup>2</sup>/сутки при колебаниях от 4,0 до 291,2 мг/м<sup>2</sup>/сутки) типичны для «сухого осаждения» в теплый период года. В целом для всех типов осаждения величина вертикального потока атмосферного материала в береговую зону юго-восточной части Балтийского моря составляет, в среднем 36 мг/м<sup>2</sup>/сутки, или 13 г/м<sup>2</sup>/год. Это примерно в пять раз выше среднего значения вертикального потока, полученного ранее (расчетным методом) для всего Гданьского бассейна (2,6 г/м<sup>2</sup>/год), и более чем в 20 раз выше значения для Арктики (0,6 г/м<sup>2</sup>/год). Полученные значения потока атмосферного материала в юго-восточной части Балтийского моря значительно ниже потоков, рассчитанных для южных регионов (для Северного Каспия они составляют около 109 г/м<sup>2</sup>/год, а для дельты Волги – 200–450 г/м<sup>2</sup>/год).

**Ключевые слова:** потоки осадочного вещества, атмосферный перенос, юго-восточная часть Балтийского моря

**FLUXES OF MATTER FROM THE ATMOSPHERE TO THE COASTAL ZONE  
OF THE SOUTH-EASTERN PART OF THE BALTIC SEA****Topchaya V.Yu., Chechko V.A.***Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: piwis@mail.ru*

The results of many years (2005–2015) of studies of the fluxes of matter from the atmosphere to the coastal zone of the south-eastern part of the Baltic Sea are presented. The studies included the collection and study of snow collected on the ice cover of the Vistula and Curonian lagoons, rainwater, and also samples of atmospheric material entering the coastal zone in dry weather («dry sedimentation»). A total of 191 samples of suspended matter in the atmosphere were collected and analyzed at ten stations, sedimented in various ways to the coastal zone. It was found that low values of fluxes – from 1.0 to 4.5 mg/m<sup>2</sup>/day (average 2.4 mg/m<sup>2</sup>/day) are typical for the winter season, when suspended in the air particles accumulate in the snow cover as a result of gravitational deposition or sedimentation with atmospheric precipitation in the form of snow. The highest fluxes (on average, 66.5 mg/m<sup>2</sup>/day for fluctuations from 4.0 to 291.2 mg/m<sup>2</sup>/day) are typical for «dry deposition» in the warm period of the year. In general, for all types of deposition, the amount of vertical fluxes of atmospheric material to the coastal zone of the south-eastern part of the Baltic Sea on average 36 mg/m<sup>2</sup>/day or 13 g/m<sup>2</sup>/year. This is about five times higher than the average value of the vertical flux obtained earlier (by the calculation method) for the all Gdansk basin (2.6 g/m<sup>2</sup>/year) and more than 20 times higher than the value for the Arctic (0.6 g/m<sup>2</sup>/year). The obtained values of the flux of atmospheric material in the south-eastern part of the Baltic Sea are much lower than those calculated for the southern regions (for the Northern Caspian they are about 109 g/m<sup>2</sup>/year, and for the Volga delta – 200–450 g/m<sup>2</sup>/year).

**Keywords:** fluxes of particulate matter, atmospheric transport, the south-eastern part of the Baltic Sea

Атмосфера, наряду с гидросферой, является средой для транспортировки и перераспределения осадочного материала в виде взвешенных в атмосферном воздухе частиц различного генезиса и размера. Поступление в атмосферу частиц и их осаждение на подстилающую поверхность осуществляется постоянно, при этом более крупные из них подвергаются гравитационному осаждению, а мелкие преимущественно вымываются атмосферными осадками. В местах осаждения атмосферные вещества оказывают серьезное воздействие на окружающую среду, так как помимо минеральной и биогенной составляющих, в их составе

присутствуют антропогенные частицы, образующиеся в результате деятельности человека [1–4].

Одним из основных показателей степени такого воздействия являются величины потоков вещества из атмосферы на подстилающую поверхность, дающие представление о пространственно-временной изменчивости количественного и вещественного состава частиц, осаждающихся при различных синоптических ситуациях. Показано [4], что сведения о величинах вертикальных потоков атмосферного материала могут служить критериями для оценки степени антропогенной нагрузки и, очевидно, в бу-

дущем станут основой для экологических исследований и мониторинга.

Для определения величин потоков атмосферного материала используют преимущественно вычислительный метод, дающий, как правило, ориентировочные значения. Это обусловлено недостаточностью прямых определений потоков, связанных с трудностями методического характера и отсутствием унифицированных методик исследований. В этой связи весьма интересными, на наш взгляд, могут быть результаты прямых измерений потоков атмосферного материала на территорию береговой зоны юго-восточной части Балтийского моря, осуществляемых в течение нескольких лет. Этот регион открыт для господствующих ветров западных румбов, то есть расположен на пути трансгра-

ничного атмосферного переноса веществ от промышленно развитых европейских стран [5] и характеризуется как рекреационный и туристический объект. Именно здесь расположены крупнейшие для Балтийского моря прибрежные мелководные лагуны, а также уникальные Балтийская и Куршская песчаные косы, последняя из которых находится под защитой Конвенции об охране всемирного культурного и природного наследия ЮНЕСКО. Этим, в частности, и обуславливается актуальность проведенных исследований.

В настоящей работе на основании результатов натурных измерений предпринята попытка оценки величин потоков осадочного вещества из атмосферы на подстилающую поверхность береговой зоны юго-восточной части Балтийского моря.

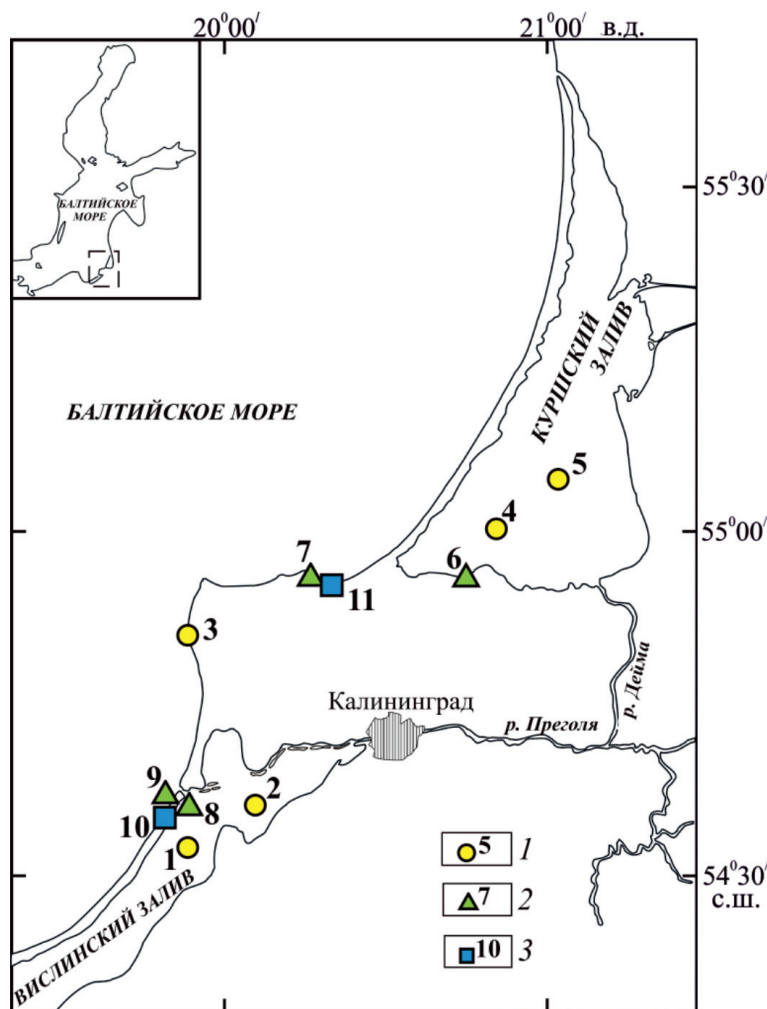


Рис. 1. Схема района исследований: 1 – местоположение точек сбора снега; 2 – местоположение точек сбора материала «сухого осаднения» в теплый период; 3 – местоположение точек сбора дождевой воды

### Материалы и методы исследования

Исходными данными для настоящей работы послужила 191 проба взвешенного в атмосфере вещества, собранного авторами в ходе полевых исследований в 2005–2015 гг. на 10 станциях в береговой зоне юго-восточной части Балтийского моря (рис. 1). Взвешенные в воздухе частицы, как известно, могут поступать на подстилающую поверхность в результате гравитационного оседания, вымывания дождями и выпадения со снегом. Поэтому, для их сбора и последующей обработки применялись различные методики.

Сбор и изучение атмосферного материала, накапливающегося в снежном покрове, проводились по методикам, принятым в практике изучения аэрозолей в Арктике [4]. Пробы снега с ледового покрова заливов и прибрежного ледового припая отбирались в конце зимы с площади  $1 \text{ м}^2$  в полиэтиленовые мешки. В камеральных условиях снег растапливался, для выделения атмосферного вещества талая вода профильтровывалась через мембранные фильтры с размером пор  $0,45 \text{ мкм}$  [6]. В дальнейшем определялась концентрация частиц в талой воде ( $\text{мг/л}$ ), размерный и вещественный состав атмосферного материала (методом сканирующей электронной микроскопии), а также рассчитывались потоки вещества ( $\text{мг/м}^2/\text{сутки}$ ) из атмосферы на подстилающую поверхность.

Сбор дождевой воды осуществлялся с помощью специального устройства, состоящего из укрепленных на треноге 2-х пластиковых сосудов-приемников воды диаметром  $28 \text{ см}$ , соединенных мягким шлангом для отвода собранной воды в накопительную емкость [7]. Пробы воды собирались, как правило, в начале дождя, продолжительность экспозиции составляла от  $1,5$  до 2-х часов. В тот же день в лабораторных условиях из полученных проб дождевой воды производилось выделение нерастворимых атмосферных частиц. Для этого вода профильтровывалась через мембранные фильтры с размером пор  $0,45 \text{ мкм}$  [6]. Затем определялась концентрация частиц в дождевой воде ( $\text{мг/л}$ ), их размерный и вещественный состав и рассчитывались потоки вещества ( $\text{мг/м}^2/\text{сутки}$ ).

Осадочные частицы, оседающие на водную поверхность естественным путем в сухую погоду (гравитационное, «сухое осаждение») улавливались с помощью плавающей ловушки [8], которая обеспечивала возможность получения материала в объ-

емах, необходимых для выполнения различного вида анализов. Принцип действия ловушки основан на известном методе сбора аэрозолей нейлоновыми сетями, устанавливаемыми на исследовательских судах. В нашем случае сети были расположены горизонтально водной поверхности, примерно в  $50 \text{ см}$  над ней. Носителем сетей являлся плавучий корпус, на котором крепились 5 сетей, каждая из которой имела площадь  $1 \text{ м}^2$ . После необходимой экспозиции сети промывались бидистиллированной водой, нерастворимые частицы отделялись от воды фильтрованием через мембранные фильтры диаметром  $47 \text{ мм}$  с размером пор  $0,45 \text{ мкм}$ .

Для сбора частиц «сухого осаждения» также применялся метод «плавающих ванночек». Суть его состояла в том, что на воду опускалась гирлянда из пластиковых ванночек с дистиллированной водой. После необходимой экспозиции вода из ванночек сливалась в стеклянную бутылку, доставлялась в стационарную лабораторию и подвергалась обработке согласно вышеописанной методике.

### Результаты исследования и их обсуждение

Содержание нерастворимых атмосферных частиц в дождевой воде изменялось от  $1,2$  до  $10,1 \text{ мг/л}$  и составляло в среднем для всего периода исследований (2008–2015 гг.)  $5,0 \text{ мг/л}$  (по 91 определению). Результаты натурных исследований не выявили значительных межгодовых колебаний их концентраций, в отличие от существенных сезонных изменений. Так, самые низкие содержания атмосферных частиц в дождевой воде (от  $1,2$  до  $3,2 \text{ мг/л}$ ) регулярно отмечались в весенние месяцы, а наиболее высокие их значения (от  $5,0$  до  $10,1 \text{ мг/л}$ ) – во второй половине лета или в начале осени.

Концентрация атмосферного материала, отложившегося за зимний период в снежном покрове на льду заливов и береговом припая, изменялась от  $2,5$  до  $12,7 \text{ мг/л}$  и равнялась в среднем для всего периода исследований (2006–2014 гг.) –  $6,8 \text{ мг/л}$  (по 40 определениям), что значительно выше значений ( $2,2 \text{ мг/л}$ ), полученных для снежного покрова Арктики [4]. Существенных межгодовых колебаний также не наблюдалось, однако были выявлены некоторые пространственные изменения в содержании атмосферных частиц. Так, например, если в снежном покрове Куршского залива их концентрация в среднем составляла  $7,6 \text{ мг/л}$ , то в снежном покрове Вислинского залива она не превышала  $5,5 \text{ мг/л}$ .

На основании данных по количественному содержанию были рассчитаны значения потоков атмосферных веществ на территорию береговой зоны (под потоком мы поднимем количество вещества, поступающего на единицу площади в единицу времени ( $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сутки}$ )). Из приведенных в таблице данных следует, что невысокие значения потоков – от 1,0 до 4,5  $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сутки}$  (в среднем 2,4  $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сутки}$  по 40 определениям) характерны для зимнего сезона, когда взвешенные в воздухе частицы накапливаются в снеговом покрове в результате гравитационного осаждения или выпадения с атмосферными осадками в виде снега. К отличительным особенностям потоков вещества в зимний период следует отнести незначительные межгодовые колебания их значений (рис. 2).

Наибольшие значения потоков (в среднем 66,5  $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сутки}$  по 72 определениям при колебаниях от 4,0 до 291,2  $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сутки}$ ) типичны для «сухого осаждения» в теплый период года. При этом отчетливо прослеживается их межгодовая изменчивость: от 33–42  $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сутки}$  в 2005–2008 гг. до 130  $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сутки}$  в 2010 г. (рис. 2). Высокие средние значения потока в 2010 г. обусловлены, вероятно, аномально высокой температурой воздуха и засухами летом этого года над территорией Евразии, способствующими поступлению в атмосферу большого количества пыли.

Величины потоков «сухого осаждения» характеризуются хорошо выраженной се-

зонной динамикой. Самые низкие их значения регулярно определялись весной, когда атмосфера не была еще в полной мере насыщена аэрозольным материалом послезимнего сезона. Наиболее высокие значения отмечались во второй половине лета – начале осени, так как в это время, помимо дальнего переноса, важнейшим поставщиком эолового материала выступают местные, локальные источники.

Сезонная изменчивость была выявлена также в величинах потоков вещества, обусловленных дождевыми водами. В них постоянно фиксировались низкие значения в весенний и осенний сезоны, а наиболее высокие – в летний период.

Величина вертикального потока атмосферного материала в береговую зону юго-восточной части Балтийского моря (для всех типов осаждения) составляет, по нашей оценке, в среднем 36  $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сутки}$ , или 13  $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$ . Это примерно в пять раз выше среднего значения вертикального потока, полученного (расчетным методом) А.И. Блажчишиным [9] для всего Гданьского бассейна (2,6  $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$ ), и более чем в 20 раз выше значения для Арктики (0,6  $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$ ). В то же время значения потока атмосферного материала в юго-восточной части Балтийского моря значительно ниже значений, полученных для южных регионов. Так, например, для Северного Каспия они составляют около 109  $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$  [10], а для дельты Волги – 200–450  $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$  [11].

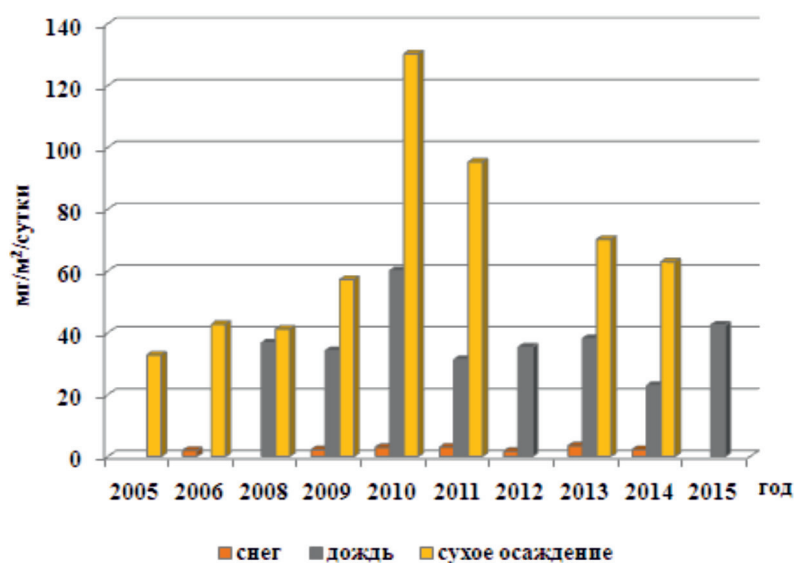


Рис. 2. Межгодовая изменчивость потоков осадочного материала из атмосферы в береговую зону юго-восточной части Балтийского моря

Значения потоков осадочного вещества из атмосферы в береговую зону  
юго-восточной части Балтийского моря в 2005–2015 гг.

Год	Количество проб	Величина потока, мг/м <sup>2</sup> /сутки		
		Осаждение со снегом	Осаждение с дождем	Сухое осаждение
2005	9	–	–	32,8 ( $n^*-9$ ) 20,1–51,2
2006	14	1,9 ( $n^*-5$ ) 1,0–2,6	–	42,7 ( $n-9$ ) 19,7–76,2
2008	22	–	36,7 ( $n-13$ ) 7,3–98,7	41,2 ( $n-9$ ) 16,4–107,7
2009	25	1,7 ( $n-5$ ) 1,2–2,3	34,2 ( $n-11$ ) 8,1–75,0	57,2 ( $n-9$ ) 8,4–127,7
	5	2,1 ( $n-5$ ) 1,4–3,2	–	–
2010	22	2,9 ( $n-5$ ) 2,4–3,1	60,1 ( $n-8$ ) 12,8–121,2	130,2 ( $n-9$ ) 5,6–291,2
2011	23	3,0 ( $n-5$ ) 2,1–3,9	31,3 ( $n-9$ ) 7,3–77,5	95,2 ( $n-9$ ) 4,4–201,7
2012	14	1,6 ( $n-5$ ) 1,1–2,1	35,3 ( $n-9$ ) 13,6–70,5	–
2013	24	3,4 ( $n-5$ ) 2,5–4,5	38,1 ( $n-10$ ) 5,8–90,0	70,2 ( $n-9$ ) 10,4–157,7
2014	23	2,2 ( $n-5$ ) 1,8–2,7	22,9 ( $n-9$ ) 10,7–82,9	62,9 ( $n-9$ ) 4,0–129,6
2015	10	–	42,5 ( $n-10$ ) 21,4–72,6	–

Таким образом, прослеживается прямая связь между величиной вертикального потока атмосферного материала и климатическими условиями региона. В данном случае величина потока атмосферного материала в береговую зону юго-восточной части Балтийского моря соответствует промежуточному значению между величиной потока в морях Арктики и морях, омывающих южные границы России. Арктические условия характеризуются незначительными поставками атмосферного осадочного материала, а климатические условия в южных регионах максимально способствуют воздушному переносу атмосферного осадочного материала (малое среднее годовое количество осадков, высокая средняя годовая температура воздуха, низкая относительная влажность атмосферы).

#### Заключение

На основании результатов натурных исследований определены многолетние (9 лет непрерывных исследований) величины потоков атмосферного осадочного вещества для береговой зоны юго-восточной части Балтийского моря, средняя величина потока составила 36 мг/м<sup>2</sup>/сутки (13 г/м<sup>2</sup>/год). Максимальные значе-

ния (в среднем 67 мг/м<sup>2</sup>/сутки) типичны для теплого, а минимальные (в среднем 2 мг/м<sup>2</sup>/сутки) – для холодного периода года. Для величин потоков в большей степени характерна сезонная, нежели межгодовая изменчивость, их значения, начиная с весеннего периода, неизменно возрастают, достигая наиболее высоких в конце лета – начала осени, а затем постепенно снижаются. Величина потока атмосферного материала в береговую зону юго-восточной части Балтийского моря соответствует промежуточному значению между величиной потока в морях Арктики и морях, омывающих южные границы России.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0001) при частичной поддержке РФФИ (проект № 14-27-00114-П).*

#### Список литературы

1. Лисицын А.П. Аридная седиментация в Мировом океане. Рассеянное осадочное вещество атмосферы / А.П. Лисицын // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 10. – С. 1398–1439.
2. Shevchenko V.P., Vinogradova A.A., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Panchenko M.V., Pol'kin V.V. Aeolian and ice transport of matter (including pollutants) in the Arctic // Implications and Consequences of Anthropogenic Pollution in Polar Environments From Pole to Pole / R. Kallenborn (editor). – Springer. – 2016. – P. 59–73.



3. Исследование нерастворимых частиц в снежном покрове Западной Сибири на профиле от Томска до эстуария Оби / В.П. Шевченко и [др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28, № 6. – С. 499–504.

4. Атмосферные аэрозоли как источник осадочного вещества и загрязнений в Северном Ледовитом океане / В.П. Шевченко и [др.] // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. – М.: Изд-во Московского университета, 2009. – С. 150–172.

5. Топчая В.Ю. Антропогенная нагрузка свинцом и кадмием на окружающую среду Калининградской области РФ – по данным ЕМЕР / В.Ю. Топчая, А.А. Виноградова // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–7. – С. 1463–1467.

6. Стародымова Д.П. Вещественный и элементный состав нерастворимых частиц в снеге северо-западного побережья Кандакшского залива Белого моря / Д.П. Стародымова, В.П. Шевченко, А.Г. Боев // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 12–2. – С. 449–453.

7. Чечко В.А. Методы исследований эолового материала в береговой зоне юго-восточной Балтики. / В.А. Чечко, В.Ю. Курченко // Создание и использование искусственных земельных участков на берегах и акватории водоемов. – Новосибирск: Труды межд. конференции, 2009. – С. 175–180.

8. Чечко В.А. Изучение потоков аэрозолей с помощью плавающей ловушки / В.А. Чечко, В.Ю. Курченко // Метеорология гидрология. – 2008. – № 11. – С. 85–89.

9. Блажичин А.И. Баланс осадочного материала в Гданьском бассейне Балтийского моря / А.И. Блажичин // Литология и полезные ископаемые. – 1984. – № 5. – С. 67–76.

10. Хрипунов И.А. Роль эоловой аккумуляции в донных отложениях северного Каспия / И.А. Хрипунов // Труды ВНИРО. – 1974. – Т. 101. – С. 32–35.

11. Бруевич С.В. Атмосферная пыль над Каспийским морем (к вопросу о морском осадкообразовании) / С.В. Бруевич, М.П. Гудков // Известия АН СССР. Серия: география. – 1954. – № 4. – С. 18–28.

## References

1. Lisicyn A.P. Aridnaya sedimentatsiya v Mirovom okeane. Rasseyannoe osadochnoe veshchestvo atmosfery / A.P. Lisicyn // Geologiya i geofizika. – 2011. – Т. 52, № 10. – pp. 1398–1439.

2. Shevchenko V.P., Vinogradova A.A., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Panchenko M.V., Pol'kin V.V. Aeolian and ice transport of matter (including pollutants) in the Arctic // Implications and Consequences of Anthropogenic Pollution in Polar Environments From Pole to Pole / R. Kallenborn (editor). – Springer. – 2016. – pp. 59–73.

3. Issledovanie nerastvorimy'x chasticz v snezhnom pokrove Zapadnoj Sibiri na profile ot Tomska do e'stuariya Obi / V.P. Shevchenko i [dr.] // Optika atmosfery i okeana. – 2015. – Т. 28, № 6. – pp. 499–504.

4. Atmosferny'e ae'rozoli kak istochnik osadochnogo veshhestva i zagryaznenij v Severnom Ledovitom okeane / V.P. Shevchenko i [dr.] // Sistema morya Laptevy'x i priliegayushix morej Arktiki: sovremennoe sostoyanie i istoriya razvitiya. – M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 2009. – pp. 150–172.

5. Topchaya V.Yu. Antropogennaya nagruzka svinczom i kadmиеm na okruzhayushhuyu sredu Kaliningradskoj oblasti RF – po dannym EMER / V.Yu. Topchaya, A.A. Vinogradova // Fundamental'ny'e issledovaniya. – 2014. – № 12–7. – pp. 1463–1467.

6. Starody'mova D.P. Veshhestvenny'j i e'lementny'j sostav nerastvorimy'x chasticz v snege severo-zapadnogo poberezh'ya Kandalakshskogo zaliva Belogo morya / D.P. Starody'mova, V.P. Shevchenko, A.G. Boev // Uspexi sovremennogo estestvoznaniya. – 2016. – № 12–2. – pp. 449–453.

7. Chechko V.A. Metody' issledovaniy e'olovogo materiala v beregovoj zone yugo-vostochnoj Baltiki / V.A. Chechko, V.Yu. Kurchenko // Sozdanie i ispol'zovanie iskusstvenny'x zemel'ny'x uchastkov na beregax i akvatorii vodoemov. – Novosibirsk: Trudy' mezhd. Konferencii, 2009. – pp. 175–180.

8. Chechko V.A. Izuchenie potokov ae'rozolej s pomoshh'yu plavayushhej lovushki / V.A. Chechko, V.Yu. Kurchenko // Meteorologiya gidrologiya. – 2008. – № 11. – pp. 85–89.

9. Blazhchishin A.I. Balans osadochnogo materiala v Gdan'skom bassejne Baltijskogo morya / A.I. Blazhchishin // Litologiya i polezny'e iskopaemy'e. – 1984. – № 5. – pp. 67–76.

10. Xripunov I.A. Rol' e'olovoj akumul'yacii v donny'x otlozheniyax severnogo Kaspiya. / I.A. Xripunov // Trudy' VNIRO. – 1974. – Т. 101. – pp. 32–35.

11. Bruevich S.V. Atmosfernaya py'l' nad Kaspijskim morem (k voprosu o morskomo osadkoobrazovanii) / S.V. Bruevich, M.P. Gudkov // Izvestiya AN SSSR. Seriya: geografiya, – 1954. – № 4. – pp. 18–28.