

Временная изменчивость скорости вымывания аэрозолей в Севастопольском регионе: натурные наблюдения

Д. А. Кременчуцкий

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ d.kremenchutskii@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 21.03.2022; одобрена после рецензирования 14.04.2022;
принята к публикации 04.05.2022.

Аннотация

Цель. Выявление особенностей сезонной и межгодовой изменчивости скорости вымывания аэрозолей и выделение факторов, определяющих эту изменчивость на исследуемых масштабах времени, – цель настоящего исследования.

Методы и результаты. Оценки скорости вымывания в период 2012–2020 гг. были проведены по натурным данным о временной изменчивости концентрации ^{7}Be на атмосферных аэрозолях и потоке ^{7}Be с «влажными» атмосферными выпадениями. С использованием корреляционного анализа получены оценки влияния количества и частоты выпадения осадков на сезонную и межгодовую изменчивость скорости вымывания. Множественный регрессионный анализ был использован для построения моделей регрессии.

Выводы. Скорость вымывания изменяется в пределах $0,21\text{--}1,40\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ и составляет в среднем $0,62 \pm 0,29\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Установлено, что ее сезонная изменчивость определяется количеством и частотой выпадения осадков. Межгодовая изменчивость скорости вымывания определяется только количеством выпавших осадков. По результатам исследований предложено две регрессионные модели. Одна модель позволяет описать сезонную изменчивость скорости вымывания, другая – межгодовую изменчивость этого параметра. В обеих моделях используются соответствующие временные ряды данных об изменчивости количества выпавших осадков в качестве предикторов. Результаты валидации показывают, что погрешности получаемых оценок составляют 21,1 и 12,9% для сезонных и годовых величин скорости вымывания соответственно.

Ключевые слова: бериллий-7 (^{7}Be), атмосферные осадки, скорость вымывания, атмосферный аэрозоль, поток

Благодарности: автор благодарит кандидата физ.-мат. наук Г. Ф. Батракова за его комментарии. Значимую техническую помощь в получении данных для этого исследования оказали А. П. Арбузова и Т. М. Иванова. Данные для исследования были получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 0555-2021-0004). Анализ данных проведен в рамках гранта, выданного Российским научным фондом (№ 20-77-00024).

Для цитирования: Кременчуцкий Д. А. Временная изменчивость скорости вымывания аэрозолей в Севастопольском регионе: натурные наблюдения // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 4. С. 345–357. doi:10.22449/0233-7584-2022-4-345-357

Temporal Variability of Aerosol Wet Deposition Velocity in the Sevastopol Region: Observational Data

D. A. Kremenchutskii

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ d.kremenchutskii@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The study is purposed at identifying both the features of seasonal and interannual variability of the aerosol wet deposition velocity and the factors that determine this variability on the time scales under study.

Methods and Results. The deposition velocity in 2012–2020 was estimated using the field data on temporal variability of the ^{7}Be concentration on atmospheric aerosols and the ^{7}Be “wet” deposition fluxes. The correlation analysis permitted to assess quantitatively the influence of the precipitation amount and frequency upon the seasonal and interannual variability of the deposition velocity. The multiple regression analysis was applied for constructing the regression models.

Conclusions. The deposition velocity varies from 0.21 to 1.40 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ and averages $0.62 \pm 0.29 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. It has been established that its seasonal variability is conditioned by the amount and frequency of precipitation, whereas its interannual variability – by the precipitation amount only. Based on the obtained results, two regression models were proposed. The first model describes seasonal variability of the deposition velocity, while the second one – the interannual variability of this parameter. The corresponding time series of precipitation variability data are used in both models as predictors. The validation results indicate that the errors in the obtained estimates constitute 21.1 and 12.9% for the seasonal and annual values of wet deposition velocity, respectively.

Keywords: Beryllium-7 (^{7}Be), precipitation, wet deposition velocity, atmospheric aerosol, wet deposition flux

Acknowledgements: the author thanks PhD (phys.-math.) Gennady F. Batrakov for the comments. The key technical laboratory assistance was provided by Alla P. Arbutova and Tamara M. Ivanova. The data for the study were obtained within the framework of state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (No. 0555-2021-0005). The data were analyzed within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 20-77-00024.

For citation: Kremenchutskii, D.A., 2022. Temporal Variability of Aerosol Wet Deposition Velocity in the Sevastopol Region: Observational Data. *Physical Oceanography*, 29(4), pp. 321-333. doi:10.22449/1573-160X-2022-4-321-333

Введение

Атмосферный аэрозоль представляет собой твердые и жидкие частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в атмосфере. Он может быть природного (напр., пыльца, эрозия почвы, извержение вулканов) и техногенного (напр., сажа, выбросы с промышленных предприятий) происхождения. Атмосферный аэрозоль содержит органические и неорганические вещества [1]. Из атмосферы аэрозоль выводится в результате гравитационного оседания и вымывания осадками. Поток аэрозоля из атмосферы на морскую поверхность является важным источником поступления многих веществ (включая биогенные вещества, радионуклиды, геотрассеры) в морскую среду [2–8]. В частности, этот поток приводит к росту продукции фитопланктона и способствует фиксации азота [9–13], а также оказывает влияние на биогеохимические процессы в водах Мирового океана [14, 15].

Вымывание атмосферного аэрозоля осадками является доминирующим механизмом его удаления из атмосферы [16]. Скорость вымывания – параметр,

который связывает концентрацию аэрозоля в атмосфере (или вещества, содержащегося на аэрозоле) с его потоком на подстилающую поверхность. Таким образом, оценив скорость вымывания и зная концентрацию интересующего вещества в атмосфере, можно рассчитать его поток из атмосферы в морскую среду. Прямые измерения скорости вымывания аэрозоля не представляются возможными. Традиционно радионуклиды являются удобными трассерами в исследованиях различных процессов, протекающих в атмосфере, включая вымывание атмосферного аэрозоля [16]. Одним из таких радионуклидов является бериллий-7 (${}^7\text{Be}$) [6, 17].

Бериллий-7 – естественный радионуклид космогенного происхождения, который непрерывно образуется преимущественно в верхних слоях атмосферы, его период полураспада равен ~ 53 сут. После образования данный радионуклид адсорбируется на атмосферном аэрозоле субмикронного размера и переносится с ним в нижние слои атмосферы. Из атмосферы ${}^7\text{Be}$ удаляется преимущественно (80–90%) путем вымывания аэрозоля «влажными» атмосферными выпадениями [16].

Исследования скорости вымывания аэрозолей в Черноморском регионе ранее не проводились.

Цель настоящей работы заключается в выявлении особенностей сезонной и межгодовой изменчивости скорости вымывания аэрозолей и в выделении факторов, определяющих эту изменчивость на исследуемых масштабах времени. Для достижения этой цели здесь представлены и проанализированы многолетние ряды натурных данных о временной изменчивости концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере и его потоках с дождевыми осадками. Эти данные были использованы для получения количественных оценок скорости вымывания аэрозоля.

Материалы и методы

Отбор проб дождевой воды. За период с января 2012 г. по декабрь 2020 г. было отобрано и обработано 405 проб дождевых осадков, которые отбирались с крыши здания Морского гидрофизического института (МГИ) РАН (г. Севастополь) с помощью эмалированной кюветы (площадь $0,64 \text{ м}^2$), расположенной на высоте $\sim 1,6$ м относительно уровня крыши и соединенной с пластиковой емкостью объемом 50 л. Такая конструкция пробоотборника позволяет эффективно собирать большой объем дождевой воды и минимизировать ее потери в результате испарения. При выпадении осадков в рабочие дни пробы отбирались один раз в день примерно в 11:00 по местному времени. В случае выпадения осадков в выходные дни происходило накопление дождевой воды. Эта вода отбиралась в ближайший рабочий день. Перед отбором пробы осадков кювета промывалась 300 мл 1–2%-ного раствора азотной или серной кислоты и 300 мл дистиллированной воды. Эта процедура позволяет минимизировать потери ${}^7\text{Be}$ в результате его сорбции на стенки пробоотборника. Величина pH пробы дождевой воды, находящейся в пластиковой емкости, понижалась примерно до двух 30%-ным раствором азотной или серной кислоты. Переливание воды из емкости и ее последующая транспортировка в лабораторию проводилась спустя 8–24 ч. Подкисление пробы и задержка по времени между отбором пробы и ее транспортировкой в лабораторию позволяет минимизиро-

вать возможные потери ${}^7\text{Be}$ в результате его сорбции на стенках емкости. В лаборатории проба сначала фильтровалась от нерастворимых примесей с использованием бумажных фильтров, затем проводилось измерение ее объема, далее дождевая вода пропусклась со скоростью 5–50 мл·мин⁻¹ через две колонки, наполненных катионитом *Dowex HCR-S/S*. Каждая колонка содержала ~ 14 мл катионита. По распределению активности ${}^7\text{Be}$ между двумя колонками с катионитом определялась эффективность извлечения радионуклида из пробы дождевых осадков. Измерения активности ${}^7\text{Be}$ в катионите проводились либо в пластиковой чашке Петри диаметром 52 мм и высотой 14 мм, либо в пластиковой виале диаметром 28 мм и высотой 70 мм.

Отбор проб атмосферных аэрозолей. За указанный период было отобрано и обработано 2056 проб атмосферных аэрозолей. Методика отбора проб атмосферных аэрозолей детально описана в работе [18]. В настоящей работе приводится ее краткое изложение. Пробы аэрозоля отбирались с крыши здания института высокопроизводительной (объемная скорость прокачки ~ 525 м³·ч⁻¹) воздухофильтрационной установкой с использованием фильтр-полотна Петрянова (ФПП-15-1,5). Данное фильтр-полотно задерживает аэрозоли размером 0,2 мкм с эффективностью 99%. В рабочие дни фильтр менялся один раз в сутки примерно в 11:00 по местному времени. В выходные дни замена фильтра не выполнялась. Таким образом, в обычном режиме за неделю отбиралось четыре суточных пробы и одна трехсуточная. По окончании отбора пробы фильтр спрессовывался в таблетку диаметром 52 мм и высотой 5 мм. Измерение активности ${}^7\text{Be}$ в пробе проводилось спустя 7–10 дней после того, как проба была отобрана. Эта задержка по времени позволяет снизить активность короткоживущих гамма-активных радионуклидов (продукты распада радона и торона) в пробе на порядки. Снижение активности этих радионуклидов существенно упрощает вид гамма-спектра и процедуру его анализа.

Измерения активности ${}^7\text{Be}$ в отобранных пробах проводились с использованием двух низкофоновых гамма-спектрометров со сцинтилляционными детекторами NaI(Tl). Первый гамма-спектрометр имел кристалл диаметром 63 мм и высотой 63 мм, разрешение 7% по пику ${}^{137}\text{Cs}$. Этот детектор находился в защите, состоящей из 15 см свинца, 5 мм кадмия, 3 мм меди и 1 см оргстекла. Второй гамма-спектрометр имел кристалл диаметром 100 мм и высотой 100 мм, с колодцем диаметром 30 мм и высотой 60 мм, разрешение 7% по пику ${}^{137}\text{Cs}$. Второй детектор находился в защите из 14 см свинца и 15 см чугуна. Время измерения единичной пробы изменялось в диапазоне 5–24 ч и зависело от активности ${}^7\text{Be}$ в пробе. Погрешность измерений активности ${}^7\text{Be}$ в пробах дождевой воды и атмосферных аэрозолей обычно не превышала 15 и 10% соответственно.

Данные об осадках. Оценки количества выпавших осадков были получены путем нормирования объема отобранной пробы осадков на площадь пробоотборника. Под частотой выпадения осадков подразумевается количество дней с осадками за рассматриваемый период времени.

Скорость вымывания аэрозоля из атмосферы рассчитывалась по следующей формуле:

$$V_d = \frac{F}{C_a}, \quad (1)$$

где V_d – скорость вымывания, $\text{см} \cdot \text{с}^{-1}$; F – усредненная за сезон или за год величина потока ${}^7\text{Be}$ из атмосферы, $\text{Бк} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; C_a – усредненная за сезон или за год величина концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере, $\text{Бк} \cdot \text{см}^{-3}$.

Результаты и обсуждение

Статистические характеристики рядов данных о потоке и концентрации ${}^7\text{Be}$. Полученные величины потока ${}^7\text{Be}$ и его концентрации в атмосфере были использованы для расчета сезонных и годовых характеристик указанных параметров. Для этого данные о потоке суммировались для каждого отдельного сезона и года, а данные о концентрации усреднялись. Временные ряды сезонных величин потока и концентрации ${}^7\text{Be}$ показан на рис. 1.

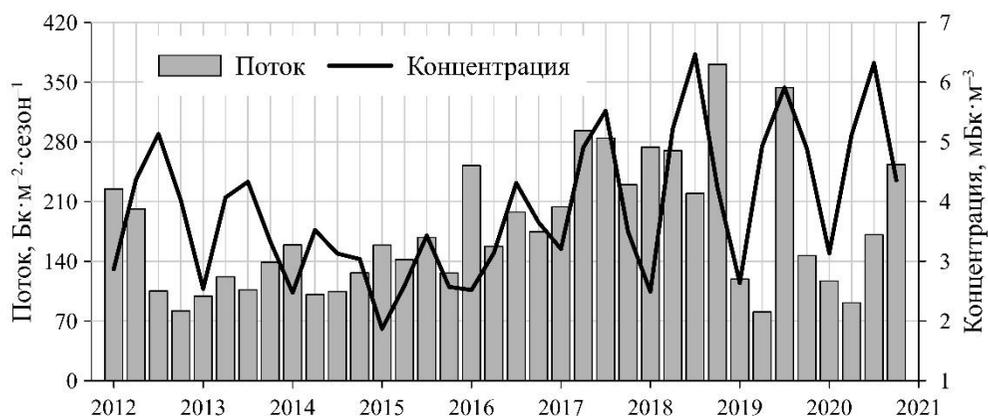
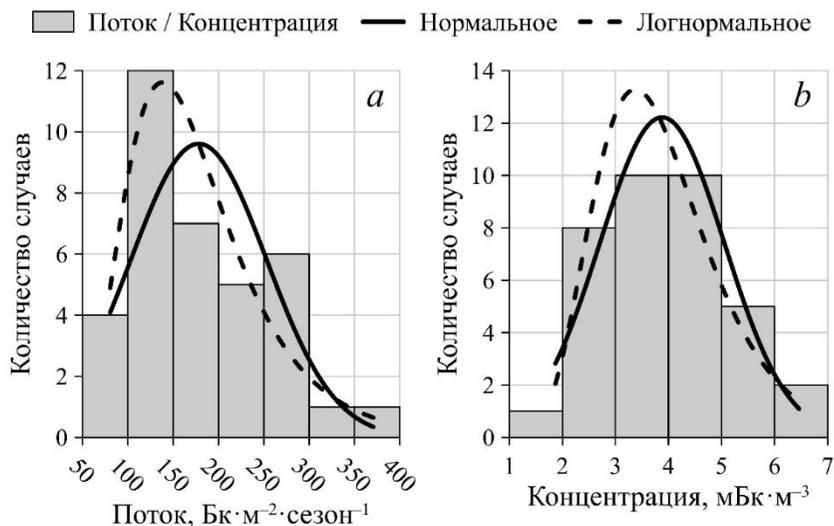


Рис. 1. Сезонная изменчивость потока и концентрации ${}^7\text{Be}$

Fig. 1. Seasonal variability of the ${}^7\text{Be}$ flux and concentration

Величины потока ${}^7\text{Be}$ с дождевыми осадками и его концентрации в атмосфере изменялись в диапазонах $81\text{--}371 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сезон}^{-1}$ и $1,9\text{--}6,5 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$ соответственно. Средние величины составили $178 \pm 76 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сезон}^{-1}$ и $3,9 \pm \pm 1,2 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$ для потока и концентрации. Частотное распределение данных обсуждаемых рядов приведено на рис. 2. Распределение исследуемых рядов ближе к логнормальному, чем к нормальному, что, согласно опубликованным сведениям из работ [19–21], является характерным для такого рода данных. Результаты тестов на нормальность Шапиро – Уилка и Андерсона – Дарлингса показывают, что частотные распределения обоих параметров отличаются от нормального статистически не значимо на уровне достоверности 99%. Коэффициенты вариации составили 43 и 31% для данных о потоке и концентрации соответственно, что указывает на наличие значительной временной изменчивости в исследуемых рядах.



Р и с. 2. Частотное распределение данных о потоке ${}^7\text{Be}$ (a) и его концентрации (b)
Fig. 2. Frequency distribution of the ${}^7\text{Be}$ flux (a) and concentration (b) data

Усредненная за весь период наблюдений суммарная за год величина потока ${}^7\text{Be}$ с «влажными» атмосферными выпадениями равна $712 \pm 227 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$. Полученная средняя величина потока согласуется с опубликованными данными: $527 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ в Дамаске, Сирия [22]; $738 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ в Рисо, Дания [23]; $736 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ в Салониках, Греция [24]; $785 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ в Александрии, Египет [25]. Для сравнения использовались данные с тех станций, на которых наблюдались близкие годовые суммы осадков.

Усредненная за весь период наблюдений среднегодовая величина концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере равна $3,9 \pm 0,8 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$. Это значение хорошо согласуется с опубликованными данными для станций, расположенных в средних широтах Северного полушария: $4,7 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ в Валенсии, Испания ($39,4^\circ$ с. ш.) [26]; $4,2 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ в Малаге, Испания ($36,7^\circ$ с. ш.) [27]; $3,8 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ в Барселоне, Испания ($41,3^\circ$ с. ш.) [28]; $3,2 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ в Бильбао, Испания ($43,1^\circ$ с. ш.) [20]; $3,7 \text{ мБк}\cdot\text{м}^{-3}$ в Любляне, Словения ($46,0^\circ$ с. ш.) [28].

Внутригодовая изменчивость скорости вымывания. Усредненная за сезон скорость вымывания ${}^7\text{Be}$ из атмосферы изменялась во времени в пределах $0,21\text{--}1,40 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ и составляла в среднем $0,62 \pm 0,29 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Полученные оценки не противоречат опубликованным данным: $0,78 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ в Брисбене, Австралия [29]; $0,5 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ в Уэльве, Испания [30]; $0,5 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ в Салониках, Греция [17].

Внутригодовая изменчивость скорости вымывания ${}^7\text{Be}$, усредненная за весь период наблюдений, показана на рис. 3, a. Наблюдается выраженная сезонная изменчивость с пониженными величинами в весенний и летний сезоны ($0,50$ и $0,49 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ соответственно) и максимальным значением в зимний сезон ($0,88 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$).

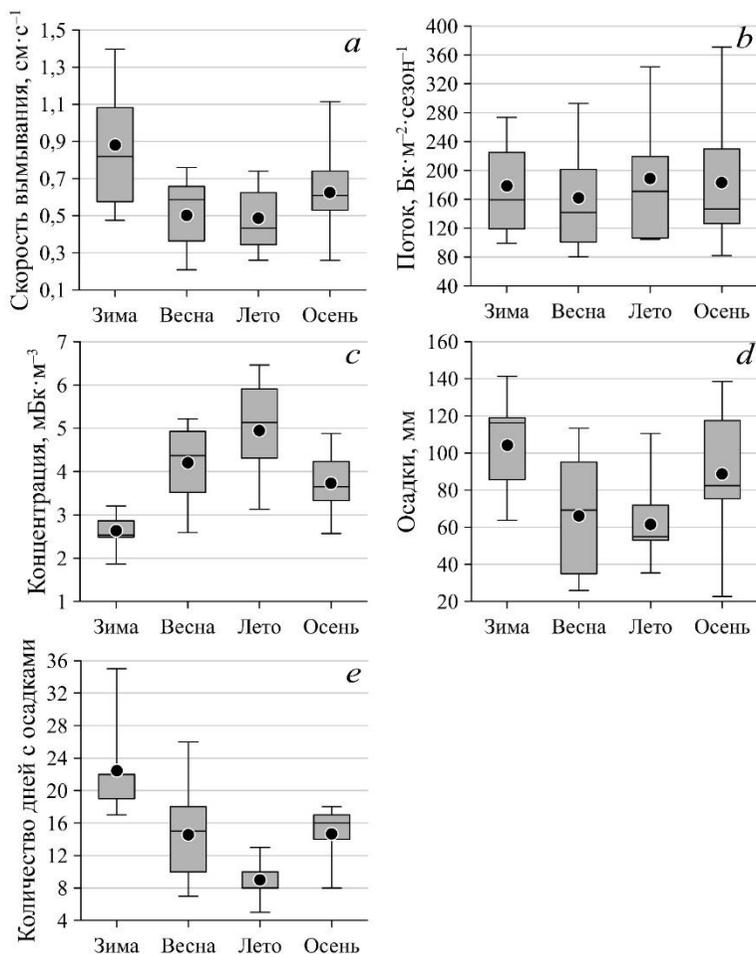


Рис. 3. Усредненные за весь период наблюдений данные о сезонной изменчивости скорости вымывания ^7Be , $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (a), потока ^7Be , $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{сезон}^{-1}$ (b), концентрации ^7Be в атмосфере, $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ (c), количества осадков, $\text{mm}\cdot\text{сезон}^{-1}$ (d) и частоты осадков, сут (e)

Fig. 3. Averaged over the whole observation period data on seasonal variability of the ^7Be wet deposition velocity, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (a), the ^7Be wet deposition flux, $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{season}^{-1}$ (b), the ^7Be concentration in the atmosphere, $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ (c), precipitation amount, $\text{mm}\cdot\text{season}^{-1}$ (d) and frequency, days (e)

Множественный регрессионный анализ был проведен с целью получения количественных оценок влияния потока и концентрации ^7Be на сезонную изменчивость скорости вымывания. Результаты анализа показывают, что сезонная изменчивость скорости вымывания на 69% определяется вариацией потока и на 31% – вариацией концентрации. Стоит отметить, что сезонная изменчивость отсутствует во временном ряду потока ^7Be (рис. 3, b), но присутствует в ряду его концентрации (рис. 3, c) с максимумом в летний сезон ($4,9 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$) и минимумом в зимний ($2,6 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$).

Согласно результатам корреляционного анализа (табл. 1), поток ^7Be статистически значимо на уровне достоверности 95% связан только с суммой атмосферных осадков ($r = 0,64$). Связь с частотой осадков и концентрацией ^7Be в атмосфере отсутствует. Таким образом, на сезонном масштабе времени чем

больше выпадает осадков, тем выше поток ${}^7\text{Be}$. Результаты корреляционного анализа показывают, что на сезонную изменчивость концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере оказывает влияние как количество, так и частота выпадающих осадков. Рост количества и частоты осадков уменьшает усредненную за сезон величину концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере. Основываясь на абсолютных величинах коэффициентов корреляции, можно сделать вывод, что на сезонном масштабе времени распределение осадков в течение рассматриваемого сезона имеет большее значение, чем объем выпавших осадков (коэффициенты корреляции $-0,51$ и $-0,38$ соответственно). Стоит отметить также, что количество и частота осадков связаны между собой: сезоны с повышенной суммой осадков характеризуются повышенной частотой ($r = 0,61$).

Т а б л и ц а 1
Table 1

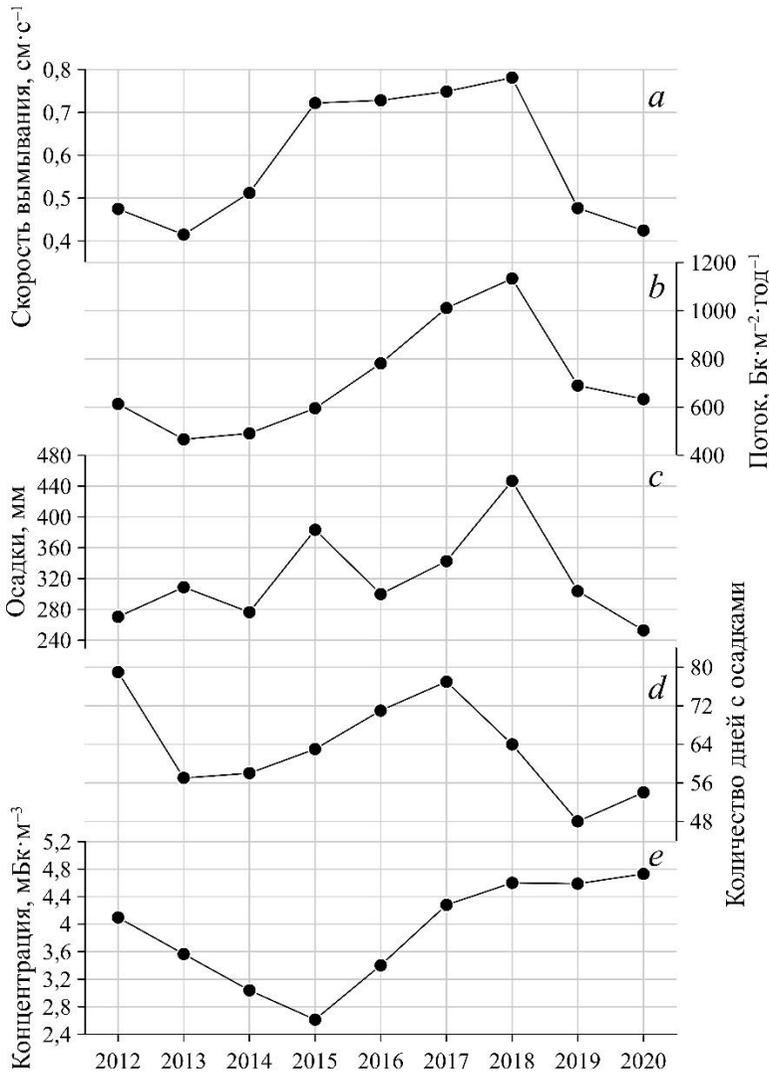
Парные коэффициенты корреляции Пирсона между сезонными значениями исследуемых параметров
Pearson paired correlation coefficients between the seasonal values of the studied parameters

Параметр / Parameter	F	Pr_a	Pr_f	C_a	V_d
F	1,0	0,64 $p < 0,01$	0,29 $p = 0,09$	0,26 $p = 0,12$	0,69 $p < 0,01$
Pr_a	–	1,0	0,61 $p < 0,01$	$-0,38$ $p = 0,02$	0,84 $p < 0,01$
Pr_f	–	–	1,0	$-0,51$ $p < 0,01$	0,60 $p < 0,01$
C_a	–	–	–	1,0	$-0,46$ $p < 0,01$
V_d	–	–	–	–	1,0

Результаты корреляционного анализа показывают, что наиболее сильная связь наблюдается между скоростью вымывания и количеством осадков ($r = 0,84$): рост количества осадков увеличивает скорость вымывания. Аналогичное по знаку, но меньшее по силе влияние на сезонную изменчивость скорости вымывания оказывает рост частоты осадков ($r = 0,60$).

Межгодовая изменчивость скорости вымывания. Многолетняя изменчивость рассматриваемых в работе параметров показана на рис. 4. Среднегодовая величина скорости вымывания изменялась в интервале $0,41\text{--}0,78 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ и составляла в среднем $0,59 \pm 0,15 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Повышенные величины ($0,72\text{--}0,78 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$) отмечались в 2015–2018 гг., пониженные ($0,41\text{--}0,51 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$) – в 2012–2014 гг. и в 2019–2020 гг. ($0,42\text{--}0,48 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$). В период 2012–2013 гг. отмечалось снижение потока ${}^7\text{Be}$ с 613 до 466 $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$, далее в 2014–2018 гг. наблюдался рост суммарной за год величины потока до 1133 $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$, после

чего в 2019–2020 гг. последовало снижение до $633 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. В период 2012–2015 гг. концентрация ${}^7\text{Be}$ в атмосфере снижалась с 4,1 до $2,3 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$, с 2016 по 2020 гг. отмечался ее рост с 3,4 до $4,7 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$.



Р и с. 4. Межгодовая изменчивость скорости вымывания ${}^7\text{Be}$ (a), потока ${}^7\text{Be}$ с осадками (b), количества (c) и частоты (d) осадков, концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере (e)

Fig. 4. Interannual variability of the ${}^7\text{Be}$ deposition velocity (a), the ${}^7\text{Be}$ wet deposition flux (b), the precipitation amount (c) and frequency (d), and the ${}^7\text{Be}$ concentration in the atmosphere (e)

Согласно результатам корреляционного анализа (табл. 2), межгодовая изменчивость среднегодовых значений скорости вымывания ${}^7\text{Be}$ определяется временной изменчивостью его потока ($r = 0,75$). Временная изменчивость потока ${}^7\text{Be}$ зависит от изменчивости количества осадков ($r = 0,67$). Таким образом, межгодовая изменчивость среднегодовых значений контролируется коли-

чеством осадков ($r = 0,76$): рост годовой суммы атмосферных осадков приводит как к росту суммарной за год величины потока ${}^7\text{Be}$, так и к росту усредненной за год величины скорости вымывания ${}^7\text{Be}$. Отметим, что по результатам корреляционного анализа (табл. 2), отсутствует статистически значимая на уровне достоверности 95% корреляционная связь между межгодовой изменчивостью скорости вымывания и концентрацией ${}^7\text{Be}$ в атмосфере. Также стоит отметить, что межгодовая изменчивость количества и частоты выпадения осадков не оказывает статистически значимого на уровне достоверности 95% влияния на межгодовую изменчивость концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

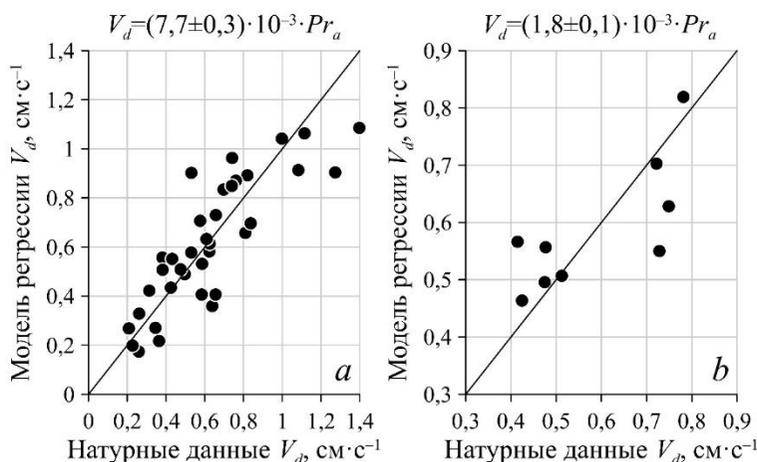
Парные коэффициенты корреляции Пирсона между годовыми значениями исследуемых параметров *
Pearson paired correlation coefficients between the annual values of the studied parameters

Параметр / Parameter	F	Pr_a	Pr_f	C_a	V_d
F	1,0	0,67 $p = 0,05$	0,38 $p = 0,32$	0,51 $p = 0,16$	0,75 $p = 0,02$
Pr_a	–	1,0	0,12 $p = 0,76$	–0,03 $p = 0,95$	0,76 $p = 0,02$
Pr_f	–	–	1,0	–0,10 $p = 0,80$	0,49 $p = 0,18$
C_a	–	–	–	1,0	–0,17 $p = 0,66$
V_d	–	–	–	–	1,0

* Обозначения см. в табл. 1.

* See designations in Table 1.

Модель регрессии. По результатам множественного регрессионного анализа предложены модели регрессии, позволяющие рассчитывать сезонную и межгодовую изменчивость скорости вымывания ${}^7\text{Be}$. Учитывая взаимосвязь между рассматриваемыми в работе параметрами (табл. 1 и 2), в качестве предиктора модели сезонной и межгодовой изменчивости скорости осаждения используются только соответствующие временные ряды количества выпавших осадков. На рис. 5 показаны результаты сопоставления рассчитанных по моделям регрессии значений скорости вымывания с полученными по натурным данным. Средние относительные погрешности получаемых оценок составили 21,1 и 12,9% для сезонных и годовых величин скорости вымывания соответственно.



Р и с. 5. Сопоставление сезонных (а) и годовых (b) величин скорости вымывания ^7Be , рассчитанных по соответствующим моделям регрессии, с полученными по натурным данным. Уравнения моделей приведены на фрагментах. Точками показаны результаты расчетов, сплошными линиями – случаи полного соответствия рассчитанных значений натурным данным

F i g. 5. Comparison of the seasonal (a) and annual (b) values of the ^7Be deposition velocity calculated using the corresponding regression model, with those resulted from the field data. Model equations are given at the fragments. The dots show the calculation results, the solid lines – the cases of full compliance of the calculated values with field data

Выводы

По результатам исследования сезонной и межгодовой изменчивости скорости вымывания аэрозолей в период 2012–2020 гг. были сделаны следующие выводы.

1. В Севастопольском регионе имеет место сезонная и межгодовая изменчивость скорости вымывания аэрозолей. Сезонные величины изменялись в диапазоне $0,21\text{--}1,40\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Пониженные значения характерны для весеннего и летнего сезонов, повышенные – для зимнего сезона. Годовые величины изменялись в более узком интервале $0,41\text{--}0,78\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Повышенные значения отмечались в период 2015–2018 гг., пониженные – в остальные годы. Среднегодовая величина скорости вымывания, усредненная за весь период наблюдений, составила $0,59 \pm 0,15\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$.

2. Результаты корреляционного анализа показывают, что сезонные вариации скорости вымывания определяются количеством и частотой выпадения осадков, межгодовая изменчивость этого параметра зависит только от количества выпавших осадков.

3. По результатам анализа предложено две регрессионные модели. Одна модель позволяет описать сезонную изменчивость скорости вымывания, другая – межгодовую изменчивость этого параметра. В обеих моделях используются соответствующие временные ряды данных об изменчивости количества выпавших осадков в качестве предикторов. Согласно результатам валидации, погрешности получаемых оценок составляют 21,1 и 12,9% для сезонных и годовых величин скорости вымывания соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вареник А. В., Калинин Д. В., Мыслина М. А.* Исследование взвешенных микрочастиц в атмосфере береговой зоны Черного моря по натурным и спутниковым данным // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 3. С. 350–361. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-3-350-361>
2. *Prospero J. M.* Saharan Dust Transport Over the North Atlantic Ocean and Mediterranean: An Overview // *The Impact of Desert Dust Across the Mediterranean* / Eds. S. Guerzoni, R. Chester. Dordrecht : Springer, 1996. P. 133–151. (Environmental Science and Technology Library book series, vol. 11). https://doi.org/10.1007/978-94-017-3354-0_13
3. *Prospero J. M.* The Chemical and Physical Properties of Marine Aerosols: An Introduction // *Chemistry of Marine Water and Sediments* / Eds. A. Gianguzza, E. Pelizzetti, S. Sammartano. Berlin, Heidelberg : Springer, 2002. P. 35–82. (https://doi.org/10.1007/978-3-662-04935-8_2)
4. Numerical simulation of the intra-annual evolution of beryllium-7 (^7Be) in the surface layer of the Black Sea / D. A. Kremenchutskii [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. P. 11120–11127. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1269-y>
5. Role of suspended matter in controlling beryllium-7 (^7Be) in the Black Sea surface layer / D. A. Kremenchutskii [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2021. Vol. 217. 103513. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103513>
6. *Kadko D., Landing W. M., Buck C. S.* Quantifying Atmospheric Trace Element Deposition Over the Ocean on a Global Scale With Satellite Rainfall Products // *Geophysical Research Letters*. 2020. Vol. 47, iss. 7. e2019GL086357. <https://doi.org/10.1029/2019GL086357>
7. *Вареник А. В.* Влияние выбросов от стационарных источников на загрязнение атмосферных осадков неорганическим азотом на примере г. Севастополя // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 3. С. 277–286. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-3-277-286>
8. *Varenik A. V., Konovalov S. K.* Variations in Concentrations and Ratio of Soluble Forms of Nutrients in Atmospheric Depositions and Effects for Marine Coastal Areas of Crimea, Black Sea // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, iss. 23. 11509. <https://doi.org/10.3390/app112311509>
9. Large-scale distribution of Atlantic nitrogen fixation controlled by iron availability / C. M. Moore [et al.] // *Nature Geoscience*. 2009. Vol. 2. P. 867–871. <https://doi.org/10.1038/ngeo667>
10. Impacts of atmospheric nutrient deposition on marine productivity: Roles of nitrogen, phosphorus, and iron / G. S. Okin [et al.] // *Global Biogeochemical Cycles*. 2011. Vol. 25, iss. 2. GB2022. <https://doi.org/10.1029/2010GB003858>
11. *Baker A. R., Jickells T. D.* Atmospheric deposition of soluble trace elements along the Atlantic Meridional Transect (AMT) // *Progress in Oceanography*. 2017. Vol. 158. P. 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2016.10.002>
12. *Вареник А. В., Козловская О. Н., Симонова Ю. В.* Оценка поступления биогенных элементов с атмосферными выпадениями в районе Южного берега Крыма (Кацивели) в 2010 – 2015 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. Т. 32, № 5. С. 65–75. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-5-65-75>
13. *Varenik A. V., Kalinskaya D. V.* The Effect of Dust Transport on the Concentration of Chlorophyll-A in the Surface Layer of the Black Sea // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, iss. 10. P. 4692. <https://doi.org/10.3390/app11104692>
14. *Morel F. M. M., Milligan A. J., Saito M. A.* Marine Bioinorganic Chemistry: The Role of Trace Metals in the Oceanic Cycles of Major Nutrients // *The Oceans and Marine Geochemistry* / Ed. H. Elderfield. Oxford : Elsevier, 2003. P. 113–143. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/06108-9>
15. *Morel F. M. M., Price N. M.* The Biogeochemical Cycles of Trace Metals in the Oceans // *Science*. 2003. Vol. 300, iss. 5621. P. 944–947. <https://doi.org/10.1126/science.1083545>
16. A global dataset of atmospheric ^7Be and ^{210}Pb measurements: annual air concentration and depositional flux / F. Zhang [et al.] // *Earth System Science Data*. 2021. Vol. 13, iss. 6. P. 2963–2994. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2963-2021>

17. *Ioannidou A.* ⁷Be aerosols and their deposition on the sea: a possible method to estimate trace metals deposition on the sea // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012. Vol. 108. P. 29–32. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.11.012>
18. *Kremenchutskii D. A.* Influence of precipitation on the daily beryllium-7 (⁷Be) activity concentration in the atmospheric surface layer // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 237. 106722. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106722>
19. ⁷Be spatial and temporal pattern in southwest of Europe (Spain): Evaluation of a predictive model / E. Chham [et al.] // *Chemosphere*. 2018. Vol. 205. P. 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.099>
20. Meteorological Factors Controlling ⁷Be Activity Concentrations in the Atmospheric Surface Layer in Northern Spain / N. Alegria [et al.] // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, iss. 12. 1340. <https://doi.org/10.3390/atmos11121340>
21. *Baskaran M., Coleman C. H., Santschi P. H.* Atmospheric depositional fluxes of ⁷Be and ²¹⁰Pb at Galveston and College Station, Texas // *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 1993. Vol. 98, iss. D11. P. 20555–20571. <https://doi.org/10.1029/93JD02182>
22. *Othman I., Al-Masri M. S., Hassan M.* Fallout of ⁷Be in Damascus City // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1998. Vol. 238, iss. 1–2. P. 187–192. <https://doi.org/10.1007/BF02385379>
23. *Fogh C. L., Roed J., Andersson K. G.* Radionuclide resuspension and mixed deposition at different heights // *Journal of Environmental Radioactivity*. 1999. Vol. 46, iss. 1. P. 67–75. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(98\)00130-1](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(98)00130-1)
24. *Ioannidou A., Papastefanou C.* Precipitation scavenging of ⁷Be and ¹³⁷Cs radionuclides in air // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. Vol. 85, iss. 1. P. 121–136. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.06.005>
25. *Saleh I. H., Abdel-Halim A. A.* ⁷Be in soil, deposited dust and atmospheric air and its using to infer soil erosion along Alexandria region, Egypt // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 172. P. 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.03.005>
26. Analysis of the influence of solar activity and atmospheric factors on ⁷Be air concentration by seasonal-trend decomposition / M. C. Bas [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 145. P. 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.027>
27. *Pinero-García F., Ferro-García M. A.* Evolution and solar modulation of ⁷Be during the solar cycle 23 // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2013. Vol. 296. P. 1193–1204. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-2373-y>
28. A climatology of ⁷Be in surface air in European Union / M. A. Hernández-Ceballos [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015. Vol. 141. P. 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.12.003>
29. *Doering C., Akber R.* Beryllium-7 in near-surface air and deposition at Brisbane, Australia // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2008. Vol. 99, iss. 3. P. 461–467. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.08.017>
30. Depositional fluxes and concentrations of ⁷Be and ²¹⁰Pb in bulk precipitation and aerosols at the interface of Atlantic and Mediterranean coasts in Spain / R. L. Lozano [et al.] // *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 2011. Vol. 116, iss. D18. D18213. <https://doi.org/10.1029/2011JD015675>

Об авторе:

Кременчукский Дмитрий Александрович, старший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8747-6612**, **ResearchID: AAC-1673-2020**, d.kremenchutskii@mhi-ras.ru