

УДК 620.193.2

Предсказания перво годовых коррозионных потерь конструкционных металлов при экстремально высоких значениях скорости осаждения хлоридов

**Ю.М. Панченко,^{1*} А.И. Маршаков,¹ Л.А. Кудрявцева,¹
В.В. Ковтанюк,¹ Т.А. Ненашева,¹ А.А. Рыбкина,¹ Т.Н. Игонин,¹
А.И. Вдовин² и Т.В. Коваль²**

¹*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН), 119071, г. Москва, Ленинский проспект. 31, корп.4.*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра “Курчатовский институт” (НИЦ “Курчатовский институт” – ВИАМ), 105005, Москва, ул. Радио, д. 17*

**E-mail: panchenkoyum@mail.ru*

Аннотация

Показана возможность предсказания перво годовых коррозионных потерь типовых конструкционных металлов (углеродистой стали, цинка, меди и алюминия) при экстремально высоких скоростях осаждения хлоридов на поверхность материала. Дана оценка удержанной толщины воды продуктами коррозии металлов после одногодовой экспозиции образцов в открытой атмосфере. Показано, что для использования высокой/экстремальной скорости осаждения хлоридов, наблюдаемых в месяцы с тайфунами/ураганами, необходимо оценивать толщины выпавших аэрозолей, возможность их стекания с поверхности образцов. Для предсказания одногодовых коррозионных потерь металлов необходимо учитывать лишь долю от скорости осаждения хлоридов на пробоотборник «влажная свеча». На основании данных, полученных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, разработана модель скорости осаждения хлоридов с учетом высоких скоростей ветра.

Ключевые слова: *атмосферная коррозия, конструкционные металлы, предсказания, функции доза-ответ, экстремальная соленость.*

Поступила в редакцию 11.08.2025 г.; После доработки 11.08.2025 г.; Принята к публикации 11.08.2025 г.

doi: [10.61852/2949-3412-2025-3-3-65-86](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2025-3-3-65-86)

Введение

Для исследования коррозионной стойкости конструкционных металлов в различных местах мира проведены международные испытания в представительных районах от Арктики до Антарктиды. Особый интерес

представляют приморские районы, имеющие при определенной засоленности атмосферы высокую ее агрессивность. По программе ISO CORRAG [1] значения скорости осаждения хлоридов ($[Cl^-]$) более 200 мг/(м²·сут) наблюдались в ограниченном количестве мест: 241 мг/(м²·сут) в Сен-Реми (Франция), 301 мг/(м²·сут) Танангер (Норвегия), 426 мг/(м²·сут) в Рай (Великобритания), 644 мг/(м²·сут) на Панама (США) и 667 мг/(м²·сут) в Кварнвик (Швеция). По проекту MISCAT [2], включающего тропические районы, значения $[Cl^-]$ также более 200 мг/(м²·сут) наблюдались лишь в трех местах: 275 мг/(м²·сут) в Синиш (Португалия), 300 мг/(м²·сут) в Форталеза (Бразилия), 360 мг/(м²·сут) в Аррайал-ду-Кабу (Бразилия).

Б. Чико, Д. де ла Фуэнте и др. [3], обрабатывая и анализируя базу данных этих программ, показали, что для морских мест с соленостью $[Cl^-]$ больше 200 мг/(м²·сут) получены низкие первогодовые коррозионные потери (K) углеродистой стали. Для дальнейшей обработки данные для отдельных мест ими были признаны аномальными и удалены из базы. М. Морсильо, Б. Чико и др. [4], основываясь на данных исследований, проведенных в разных частях мира в течение последних 40 лет, заключили, что при $[Cl^-]$ менее 100 мг/(м²·сут) наблюдается незначительное увеличение атмосферной коррозии стали, которая в последующем увеличивается до $[Cl^-] = 400$ мг/(м²·сут). После этого возрастание коррозии с соленостью снова становится незначительным, в дальнейшем по мере увеличения солености атмосферы коррозия, по-видимому, стабилизируется. В своих работах И. Диаз и др [5] для 6-ти мест испытаний в Кабо Вилано (Испания) на разных расстояниях от моря приводят среднегодовые скорости осаждения хлоридов от 70 до 1906 мг/(м²·сут). Х. Алькантара и др [6] при испытаниях также в Кабо Вилано в следующем году за два 3-х месячных периода на расстоянии нескольких метров от морского берега получили скорость осаждения хлоридов 2200 и 1700 мг/(м²·сут). Авторы свидетельствуют, что при солености больше 600 мг/(м²·сут) скорость коррозии стали, по-видимому, стабилизируется. Они предположили, что причина несоответственно низкой коррозии стали заключается в меньшей растворимости кислорода в водном слое осажденной воды на металлической поверхности с очень высокой концентрацией хлорида.

Для мест с соленостью более 600 мг/(м²·сут) в литературе существует не так много данных по коррозии, чтобы однозначно подтвердить факт стабилизации коррозии стали, указанный в работах [4–6].

Аномально высокие значения $[Cl^-]$, как правило, фиксируются в результате штормов, которые, несмотря на свою кратковременность (несколько часов или суток), вырабатывают большое количество соли, даже больше, чем за целый месяц при нормальном ветровом режиме. Так, в тропическом климате Кубы на расстояниях 60–360 м от берега моря А. Кастанеда и др. [7] получили среднемесячные значения солености в диапазонах 60–620 мг/(м²·сут) по методу сухих полотен. На западном побережье Швеции во время двух штормов длительностью 1/2 суток и 3 суток общее количество выпавшей соли составило 4900 мг/м² [8].

Таким образом, до настоящего времени отсутствуют объяснения несоответствия коррозионных потерь металлов за первый год высоким и экстремально высоким значениям $[Cl^-]$ и также отсутствует возможность использования высоких величин $[Cl^-]$ в разработанных моделях предсказания K .

Целью данной работы является оценка в первом приближении эффективной скорости осаждения хлоридов $[Cl^-]^{эф}$ на поверхность металлов при высоких и экстремально высоких значениях $[Cl^-]$ на пробоотборниках для предсказания годовых коррозионных потерь металлов.

Методика работы

На побережье Черного моря на коррозионной площадке Геленджикского центра климатических испытаний им. Г.В. Акимова НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее ГЦКИ) проведены 2 годовых испытания металлов сталь, цинк, медь, алюминий на расстояниях 15, 50 и 100 м от берега [9]. Образцы располагались на стендах под углом 45° , верхней стороной в 2-х направлениях: к кратчайшему берегу моря и в противоположном направлении. Годовые экспозиции образцов начинались с 01.07.2022 г. и с 01.09.2022 г.

В период проведения испытаний осуществлялась непрерывная регистрация метеорологических параметров: температура (T , $^\circ C$) и относительная влажность (RH , %) воздуха, количество осадков ($Prec$, мм), скорость (V , м/с) и направления ветров. Данные метеопараметров получены автоматической метеостанцией с усреднением всех параметров каждые 10 минут. Это позволило определить ветровой режим с достаточной точностью: скорость ветра с точностью 0,1 м/с, направления ветров от 0 до 360° с интервалом 1° .

Для оценки среднесуточной скорости осаждения хлоридов $[Cl^-]$, мг/($m^2 \cdot \text{сут}$)), использовали «влажную свечу», период экспозиции которой составлял 1 месяц [10]. Загрязненность атмосферы сернистым газом $[SO_2]$ оценивали с использованием сульфатных пластин.

Толщину воды, удержанной продуктами коррозии на образцах после испытаний, определяли по отношению разницы объемов воды до погружения образцов в нее и после их извлечения и стекания воды в емкость к общей площади образца. Для стекания воды образцы удерживали под углом 45° в течение 1 минуты (до окончания стекания).

Предсказания годовых коррозионных потерь металлов осуществлены по ФДО, представленных в [11], ФДО для прогноза коррозионных потерь за первый год для атмосферы с температурой $T > 10^\circ C$ имеют вид уравнений (1)–(4): для углеродистой стали

$$K = 7,7 \cdot \{[SO_2]^{0,47} + 0,68 \cdot [Cl^-]^{0,58}\} \cdot e^{(0,024 \cdot RH - 0,065 \cdot (T-10) + 0,00035 \cdot Prec)} \quad (1)$$

для Ц0

$$K = 0,55 \cdot \{[SO_2]^{0,36} + 0,64 \cdot [Cl^-]^{0,27}\} \cdot e^{(0,023 \cdot RH - 0,055 \cdot (T-10) + 0,00035 \cdot Prec)} \quad (2)$$

для меди

$$K = 0,50 \cdot \{[\text{SO}_2]^{0,38} + 0,61 \cdot [\text{Cl}]^{0,62}\} \cdot e^{(0,025 \cdot RH - 0,055 \cdot (T-10) + 0,0003 \cdot Prec)} \quad (3)$$

для алюминия

$$K = 0,010 \cdot \{[\text{SO}_2]^{0,67} + 0,46 \cdot [\text{Cl}]^{0,85}\} \cdot e^{(0,039 \cdot RH - 0,065 \cdot (T-10) - 0,0001 \cdot Prec)} \quad (4)$$

где K – коррозионные потери за первый год, г/м² (далее $K^{\text{пр}}$); T – среднегодовая температура, °C; RH – среднегодовая относительная влажность воздуха, %; $Prec$ – суммарное годовое количество осадков, мм; $[\text{SO}_2]$ – среднегодовая концентрация SO_2 , мкг/м³; $[\text{Cl}]$ – скорость осаждения Cl^- , мг/(м²·сут).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний

В таблице 1 представлены коррозионные потери металлов для 2-х постановок образцов, установленных верхней стороной к морю (1 направление) и верхней стороной от моря (2 направление). Среднегодовые метеорологические параметры атмосферы и скорость осаждения даны в таблице 2, а средние за месяц скорости осаждения хлоридов – в таблице 3.

Таблица 1. Первогодовые коррозионные потери металлов ($K^{\text{экс}}$, г/м²) на разных расстояниях от берега.

Расстояние	1 направление		2 направление	
	постановка		постановка	
	1	2	1	2
сталь				
15м	329	302	250	247
50м	259	295	200	277
100м	214	230	190	216
цинк				
15м	7,88	7,54	6,91	6,97
50м	5,92	8,7	7,26	7,83
100м	5,68	6,31	5,28	5,4
медь				
15м	28,3	25,57	31,09	36,69
50м	22,92	27,86	26,13	24,21
100м	15,89	15,95	16,49	16,84
алюминий				
15м	1,79	0,73	2,63	0,81
50м	1,22	0,99	1,87	0,88
100м	0,64	0,84	1,29	0,68

Таблица 2. Среднегодовые параметры агрессивности атмосферы за периоды экспозиции.

Постановка	Период экспозиции	T , °C	RH , %	$Prec$, мм	$[\text{SO}_2]$, мкг/м ³
1	01.07.22г – 30.06.23г	15,2	71	605,2	0,96

2	01.09.22г – 31.08.23г.	15,4	70	502,1	0,64
---	------------------------	------	----	-------	------

Таблица 3. Скорости осаждения хлоридов, мг/(м²·сут) на расстояниях 15 м, 50 м и 100 м от берега.

Период экспозиции	[Cl], мг/(м ² ·сут)		
	15 м	50 м	100 м
Июль 2022г	22,1	13,4	8,9
Август 2022г	68,7	50,8	33,3
Сентябрь 2022г	128,2	59,5	24,5
Октябрь 2022г	36,4	23,1	14,0
Ноябрь 2022г	9,6	13,0	13,4
Декабрь 2022г	52,7	19,0	9,6
Январь 2023г	12,9	19,0	9,6
Февраль 2023г	2850	2498	1606
Март 2023г	111	85,2	60,5
Апрель 2023г	7,3	3,6	6,7
Май 2023г	102	45,1	17,3
Июнь 2023г	29,5	13,7	6,3
Ср. для постановки 1	286	237	151
Июль 2023г	6,8	5,8	4,9
Август 2023г	114	47,7	15,1
Ср. для постановки 2	288	236	149

Приблизительная оценка сохранения хлоридов на поверхности металлических образцов при экстремально высокой скорости осаждения на пробоотборники

Рассмотрим возможные ситуации, когда высокие/экстремальные скорости осаждения хлоридов могут влиять или практически не влиять на коррозию металлов. Прежде всего, необходимо дать отличие осаждения и сохранения морских аэрозолей на влажную свечу и на поверхность металлов.

Все морские аэрозоли, попадающие на влажную свечу в любом количестве, суммируются, поступая в воду в емкости. При этом рассчитанная скорость осаждения хлоридов на свечу соответствует среднесуточному осаждению хлоридов на единицу поверхности. Ежесуточное осаждение приблизительно равно любого количества морских аэрозолей на поверхность образцов обуславливает ежесуточную коррозию металлов в зависимости от климатических факторов. Соли, удаленные с поверхности дождями, ветром, пополняются следующей порцией осажденных аэрозолей. Можно ожидать, что в этом случае величина $K^{\text{экс}}$ постулируется даже при высокой скорости осаждения хлоридов.

Так, в Шерман-Брэйкуотер (Панама) [12, 13] при $[Cl]=1490$ мг/(м²·сут) по «полотну», в пересчете на «влажную свечу» – 3578 мг/(м²·сут) [14], коррозия стали составила 3661 г/м². Такая высокая скорость осаждения хлоридов, скорее всего, получена при периодическом осаждении большой массы хлоридов, то есть, происходит непрерывное пополнение солей при выветривании и смывании ранее осажденных. При использовании в ФДОН (Ур. 1) $[Cl]=3661$ мг/(м²·сут) и

параметров агрессивности: температура – 27°C, относительная влажность – 66%, количества осадков – 3700 мм, скорость осаждения $\text{SO}_2 = 4,3 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, величина $K^{\text{тп}}$ получена, равной $3632 \text{ г}/\text{м}^2$. Периодическое большое осаждение хлоридов можно оценить по периодичности и продолжительности морских ветров со скоростью более 5–7 м/с.

Другая ситуация для коррозии металлов при разовом осаждении экстремально большой массы аэрозолей. Одна и та же величина $[\text{Cl}]$ за месячный период может быть получена при разных условиях. Например, $[\text{Cl}] = 50 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ при месячной экспозиции пробоотборника может быть получена при ежесуточном осаждении $50 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, а также при выпадении в одни сутки – $1000 \text{ мг}/\text{м}^2$, а в остальные 30 суток – по $20 \text{ мг}/\text{м}^2$. Большая масса осаждающихся хлоридов за короткое время не может оказать существенного влияния на коррозию. Это связано с тем, что морские соли не могут сохраняться на поверхности металлов даже под навесом [15]. Так, при месячных испытаниях на СКС ИФХЭ РАН (Дальние Зеленцы) скорости осаждения хлоридов на «сухое полотно» составили от $1,7 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ до $32,1 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, а рассчитанные скорости осаждения хлоридов на металлы с учетом их содержания в растворимых продуктах коррозии не превысили $5 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ при экспозиции образцов под навесом и на открытой площадке, рисунок 1 [16]. На образцах под навесом удержанных хлоридов лишь незначительно больше.

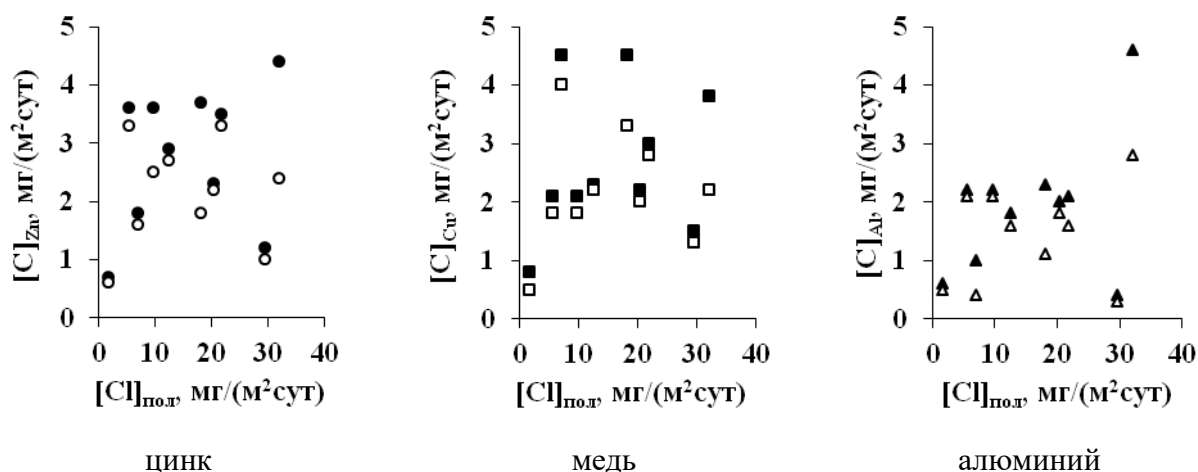


Рисунок 1. Соотношение сохранившихся хлоридов на цинке (●○), меди (■□), алюминии (▲△) со скоростью осаждения на сухое полотно. Месячные испытания металлов под навесом (●, ■, ▲) и на открытой площадке (○, □, △).

В ГЦКИ в феврале за счет урагана получены экстремально высокие величины $[\text{Cl}]$, составляющие $2850 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, $2498 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ и $1606 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ на расстояниях 15 м, 50 м и 100 м, соответственно, таблица 3. Среднегодовые $[\text{Cl}]$ с использованием $[\text{Cl}]$ февраля были в 30–66 раз больше величин $[\text{Cl}]$ для остальных месяцев. При среднегодовых $[\text{Cl}]$ (таблица 3) предсказанные $K^{\text{тп}}$ по ФДОН были завышены в сравнении с экспериментальными $K^{\text{эк}}$: стали в 2,0–3,2 раза, цинка в 2,6–4,1 раза, меди в 1,5–2,5 раза и алюминия в 2,3–8,1 раза. Это свидетельствует о невозможности использования экстремально высоких значений

[Cl] на пробоотборниках при расчете среднегодовых [Cl].

Коррозионные потери металлов настоящих испытаний, например, на расстоянии 50 м составили: стали 259 г/м², цинка 5,92 г/м², меди 22,92 г/м² и алюминия 1,22 г/м². Для трех годовых постановок в ГЦКИ, проведенных 2017–2018 г. также на расстоянии 50 м от берега, коррозионные потери составили интервалы значений [17]: сталь 267–442 г/м²; цинк 10,88–20,93 г/м²; медь 28,9–33,2 г/м²; алюминий 0,87–1,96 г/м². Сопоставление величин коррозионных потерь свидетельствуют, что коррозионные потери настоящих испытаний сопоставимы и даже несколько меньше, чем в 2017–2018 г. при практически одинаковых параметрах агрессивности атмосферы, кроме [Cl]. Это свидетельствует о том, что высокая скорость осаждения хлоридов, полученная за короткий период в феврале, не оказала влияние на коррозию металлов.

После годовых испытаний на ГЦКИ на образцах под навесом скорости осаждения хлоридов, содержащихся в растворимых продуктах коррозии и на поверхности металлов, не превысили 1,5 мг/(м²·сут), рисунок 2. При этом среднегодовые [Cl] на свечу составили от 149 до 288 мг/(м²·сут) на расстояниях 100 м и 15 м соответственно (таблица 3),

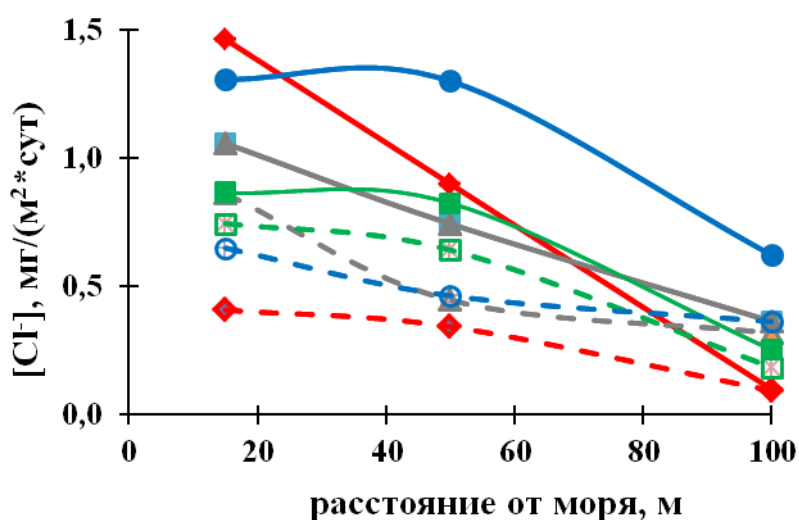


Рисунок 2. Среднегодовая скорость осаждения хлоридов после годовых экспозиций образцов под навесом в ГЦКИ на поверхность стали (●, ○), цинка (▲, Δ), меди (◆, ◇) и алюминия (■, □) для 1 (●, ▲, ◆, ■) и 2 (○, Δ, ◇, □) постановок образцов.

Следовательно, хлориды долго не удерживаются на поверхности даже в отсутствии дождей и, чем больше срок экспозиции, тем меньше величина [Cl], определенная по количеству хлоридов на образцах металлов. Это свидетельствует о том, что большая масса хлоридов не может долго сохраняться на поверхности и взаимодействовать с металлом. Четкого объяснения этому нет, но, по мнению авторов [18], очистка поверхности металлов на открытой площадке осуществляется дождями.

Оценка удержанной толщины воды продуктами коррозии

В морской атмосфере на поверхность металлов осаждаются гигроскопические соли NaCl, содержащиеся в морской воде. Жидкая фракция в морском аэрозоле резко возрастает с увеличением относительной влажности воздуха [19]. Соль будет влажной при относительной влажности выше 75% [19, 20]. Исследователи работ [21, 22] считают, что при высокой относительной влажности частицы аэрозоля осаждаются на поверхностях в виде солевого раствора, а не в виде кристаллов. Увеличение жидкой фракции в морских аэрозолях при повышенной влажности воздуха едва ли приведет к стеканию морских аэрозолей с поверхности при небольших значениях [Cl].

Размеры крупных (грубых) аэрозолей, произведенных в зоне прибой имеют диаметр 80 мкм [23], более 100 мкм и даже 400 мкм [20, 24]. Коул и Патерсон [19] обнаружили, что эффективный предел дождя для очистки оцинкованного стального кровельного листа составляет 1,3 мм, а при высоте выпавших дождей 1,5 и 3 мм произойдет очистка поверхности до 10 и 1% исходных загрязняющих веществ, соответственно. Учитывая, что экстремально высокие [Cl] получены при сильных ветрах (тайфуны, ураганы, штормы), выносящих на сушу крупные аэрозоли (капли, брызги), можно сделать выводы: для начала стекания непосредственно аэрозолей с поверхности металлов необходимо осаждение слоев высотой из 16 капель и 3 капель размерами 80 мкм и 400 мкм, соответственно. А для очистки поверхности до 10% от исходно загрязняющих веществ, что, видимо, можно рассматривать, как смену слоев аэрозолей, необходимы слои из 19 и 4 капель и до 1% – 38 и 8 капель размерами 80 мкм и 400 мкм, соответственно.

Нами была проведена оценка количества воды (выраженного как высота слоя воды), удержанного продуктами коррозии на поверхности образцов металлов после годовой их экспозиции под навесом в ГЦКИ. Высота удержанной воды (h , мкм) продуктами коррозии в зависимости от их массы ($m_{\text{ПК}}$, г/м²) представлена на рисунке 3.

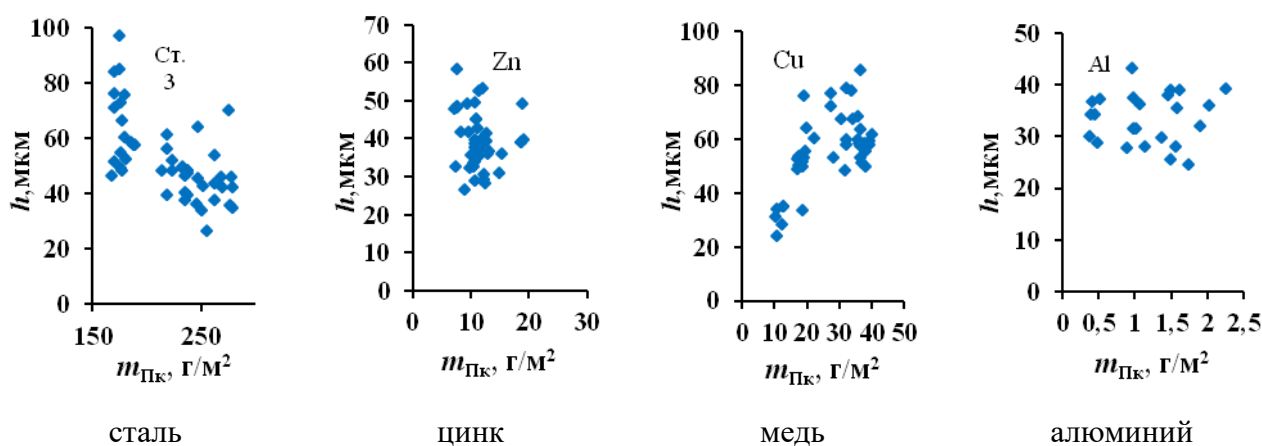


Рисунок 3. ГЦКИ. Высота удержанной воды на поверхности образцов при различной массе продуктов коррозии металлов.

Согласно этим результатам на поверхности образцов после годовой

экспозиции может удерживаться слой воды высотой от 30–100 мкм на стали до 20–40 мкм на алюминии при наблюдающейся массе удержанных продуктов коррозии.

На образцах после годовых испытаний на открытой площадке и под навесом на ДВКС величины h на всех металлах составляют в основном от 30 до 100 мкм, рисунок 4.

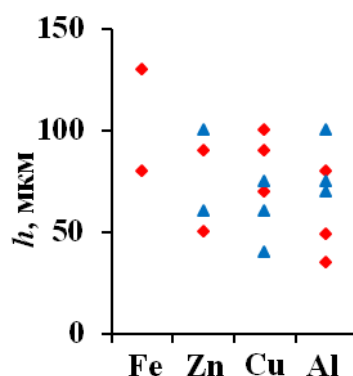


Рисунок 4. ДВКС. Высота удержанной воды на поверхности образцов металлов после их годовых экспозиций на открытой площадке (♦) и под навесом (▲).

Следовательно, после годовых испытаний в разных условиях агрессивности атмосфер при разных экспозициях образцов высота удержанной воды на их поверхности не превышает 100 мкм. Большее количество воды, видимо, будет стекать с поверхности. В связи с этим необходимо оценить возможную толщину слоя морской воды на поверхности образцов при экстремальных условиях образования аэрозолей.

Оценка толщины морской воды, осаждаемой на поверхность образцов, во время тайфуна на ДВКС и урагана в ГЦКИ

На ДВКС ИФХЭ РАН (г. Владивосток) в сентябре 2020 г. непрерывно в течение 8 часов наблюдался тайфун Майсак при температуре от 22°C до 24,4°C и относительной влажности воздуха от 78% до 90%. Средняя за месяц величина $[Cl]$ составила 445 мг/(м²·сут) [25]. Такая величина $[Cl]$ получена только за счет тайфуна, так как в остальные дни ветры морских направлений и их скорость были незначительные. Ураган в ГЦКИ наблюдался приблизительно в течение 3-х суток февраля при скорости морских ветров от 6 м/с при температуре от –2,8°C до +0,9°C и относительной влажности от 73% до 79%. Средняя за месяц величина $[Cl]$ составила 2850 мг/(м²·сут). В период тайфуна наблюдался мокрый снег высотой 1,6 мм.

Для выяснения возможного стекания слоев выпавших аэрозолей сделаем приблизительный расчет их толщины. Соленость Японского моря равна 33‰, и соленость Черного моря в месте расположения ГЦКИ – 17‰. Расчет выполнен с учетом концентрации ионов хлорида (19500 мг/л в Японском море и 10636 мг/л в Черном море), таблица 4. Толщину слоя морской воды (h , мкм), выпавшей на поверхность образца за 1 час времени тайфуна/урагана для каждого варианта

расчета определяли по уравнению (5):

$$h, \text{ мкм} = \sum \text{Cl} (\text{мг/м}^2), \text{ осажденных за 1 час/к-цию Cl} (\text{мг/м}^3) \text{ в морской воде} \quad (5)$$

Таблица 4. Расчет толщины слоя морской воды, выпавшей на поверхность образца во время тайфуна (ДВКС) и урагана (ГЦКИ).

Японское море	Черное море
Соленость 33‰	Соленость 18‰
Cl, 19500 мг/л	Cl, 10636 мг/л
Cl, 19500000 мг/м ³	Cl, 10636000 мг/м ³
19500000	10636000
натурные испытания	
[Cl] = 445 мг/(м ² ·сут)	[Cl] = 2850 мг/(м ² ·сут)
Σмесяц [Cl] = 13350 мг/м ²	Σмесяц [Cl] = 79800 мг/м ²
Продолжительность тайфуна 8 часов	Продолжительность урагана 72 часа
Σ[Cl] за 1 час	Σ[Cl] за 1 час
1668,8 мг/м ²	1108,3 мг/м ²
толщина слоев за 1 час, h, м	толщина слоев за 1 час, h, м
0,00008558	0,000104203
толщина слоев за 1 час, h, мкм	толщина слоев за 1 час, h, мкм
85,6	104,2
	толщина слоев за 72 часа, h, мкм
	7503

На ДВКС за 1 час тайфуна, согласно расчету величина h составила 85,6. Эти толщины соответствует толщинам удержанной воды на металлах. Но стекание слоев аэрозолей маловероятно, так как при высокой температуре слои могут частично высыхать и за 8 часов не накопится достаточная толщина. В работе [25] при прогнозировании годовых коррозионных потерь металлов $K^{\text{пр}}$ в ФДО использована фактическая величина [Cl]. Рассчитанные $K^{\text{пр}}$ в основном сопоставимы с экспериментальными коррозионными потерями.

В ГЦКИ за 1 час урагана h составила 104,2 мкм. При температуре воздуха близких 0°C и влажности более 70% полное высыхание слоев морской воды такой толщины в течение часа едва ли возможно. Такая толщина больше удержанной толщины воды на поверхности металлов в ГЦКИ, рисунок 3. За все время урагана общая толщина осажденной морской воды составляет 7,50 мм. С учетом осадков, выпавших в период урагана, толщина составила бы 9,10 мм. Такая толщина слоев более чем в 10 раз больше толщины воды, удерживаемой на поверхности металлов, и приблизительно в 6 раз больше толщины, необходимой для очистки поверхности согласно [19]. Вероятнее всего невысохшие слои на металлах будут пополняться следующими аэрозолями (брызгами и каплями).

Несмотря на приблизительные оценки толщин осажденных аэрозолей, а также слоев аэрозолей, достаточных для стекания, можно предположить два

варианта эффективных величин $[Cl]^{эф}$: – $1/10[Cl]^{св}$ и $1/5[Cl]^{св}$ от измеренной скорости осаждения пробоотборниками $[Cl]^{св}$ на разных расстояниях. Это лишь предположения, которые не имеют однозначного доказательства.

Предсказания первогодových коррозионных потерь металлов

Необходимые для расчета K за первый год по уравнениям (1) – (4) среднегодовые метеорологические параметры атмосферы и $[SO_2]$ представлены в таблице 2. Среднегодовые скорости осаждения хлоридов на разных расстояниях с учетом для февраля $[Cl]^{эф}$, равным $1/10$ и $1/5 [Cl]^{св}$, представлены в таблице 5. Величины $[SO_2]$, составляющие $0,96$ и $0,64$ $мкг/м^3$, согласно условиям ФДО были заменены на 1 $мкг/м^3$ [14].

Таблица 5. Среднегодовые скорости осаждения хлоридов $[Cl]$, $мг/(м^2 \cdot сут)$ на разных расстояниях от берега.

Для февраля доля $[Cl]^{эф}$ от $[Cl]^{св}$	постановка	$[Cl]$, $мг/м^2 \cdot сут$		
		15м	50м	100м
1/10	1	72,1	49,6	30,4
	2	74,6	48,7	28,5
1/5	1	95,9	70,4	43,8
	2	98,4	69,5	41,9

Сопоставление прогнозных величин $K^{пр}$ с экспериментальными $K^{экс}$ представлены для металлов при использовании для февраля $[Cl]^{эф} = 1/10[Cl]^{св}$ (рисунок 5) и $[Cl]^{эф} = 1/5[Cl]^{св}$ (рисунок 6). Согласно рисункам при использовании для февраля $[Cl]^{эф} = 1/10[Cl]^{св}$ хорошее совпадение $K^{пр}$ с $K^{экс}$ по величине в пределах относительных ошибок и по категориям получено для стали и алюминия. Для меди $K^{пр}$ также соответствуют $K^{экс}$ в пределах относительных ошибок, но наблюдается некоторое несоответствие категорий. При использовании для февраля $[Cl]^{эф} = 1/5[Cl]^{св}$ более достоверные $K^{пр}$ получены для меди, но для стали и алюминия результаты $K^{пр}$ несколько хуже. Представленные отличия $K^{пр}$ для каждого металла связаны с среднегодовыми $[Cl]$, рассчитанными с учетом $[Cl]^{эф}$. Можно предположить, что для стали и алюминия более достоверным является предположение 10-ти кратного стекания аэрозолей с поверхности, а для меди – 5-ти кратное.

Несмотря на существенное отличие предполагаемой доли $[Cl]^{эф}$ от $[Cl]^{св}$ полученные величины $K^{пр}$ являются в обоих случаях достаточно сопоставимыми с $K^{экс}$ и/или сопоставимыми являются оцененные категории коррозионной агрессивности по $K^{пр}$ с категориями, определенными по $K^{экс}$.

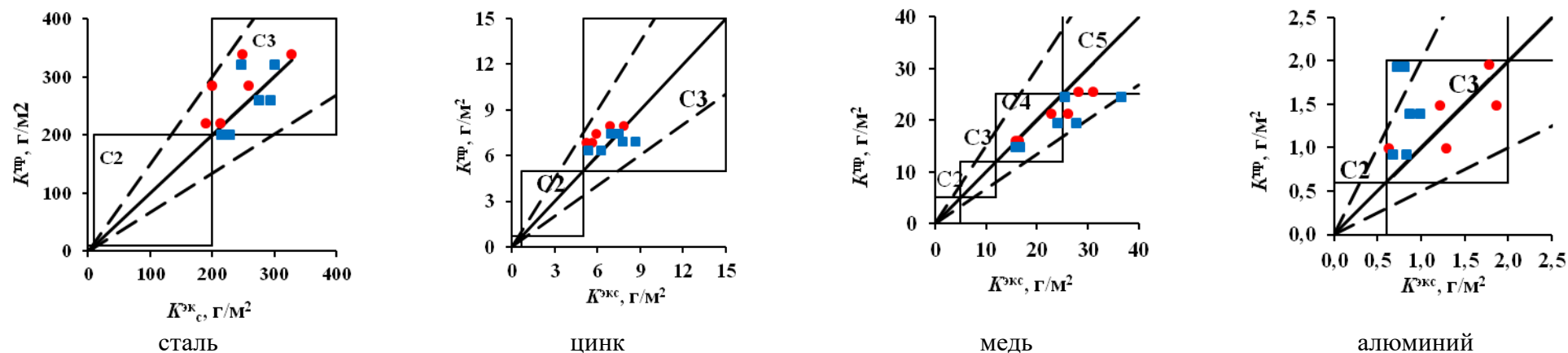


Рисунок 5. Учет для февраля $[Cl]^{эф} = 1/10[Cl]^{св}$. Сопоставление K^{np} с $K^{экс}$ и категорий, оцененных по K^{np} , с категориями, определенными по $K^{экс}$, для 1-ой (●) и 2-ой (■) постановок образцов на расстояниях 15, 50 и 100 м от берега моря. Интервал относительных ошибок (---) от -33% до +50% для стали, цинка и меди и от -50% до 100% для алюминия. Линия (—) $K^{np} = K^{экс}$.

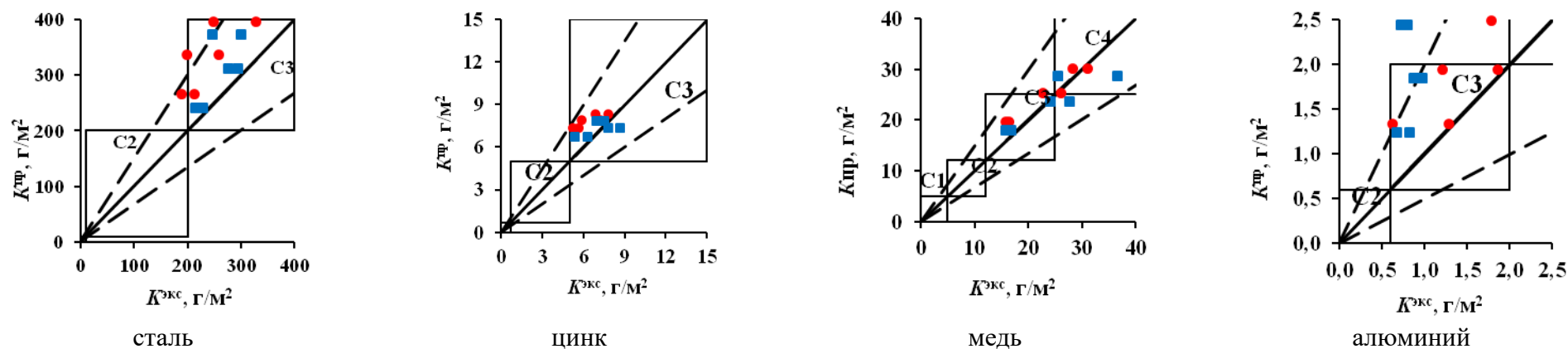


Рисунок 6. Учет для февраля $[Cl]^{эф} = 1/5[Cl]^{св}$. Сопоставление K^{np} с $K^{экс}$ и категорий, оцененных по K^{np} , с категориями, определенными по $K^{экс}$, для 1-ой (●) и 2-ой (■) постановок образцов на расстояниях 15, 50 и 100 м от берега моря. Интервал относительных ошибок (---) от -33% до +50% для стали, цинка и меди и от -50% до 100% для алюминия. Линия (—) $K^{np} = K^{экс}$.

Модель зависимости скорости осаждения хлоридов от энергии ветра с использованием экстремально высоких скоростях в период урагана

Скорость осаждения хлоридов на поверхности зависит от множества факторов, включающих помимо ветрового режима, расположение места испытаний относительно морских/соленых ветров, расстояние от берега, высоту места расположения, состояние морского дна, рельеф местности, инфраструктуру, продолжительность и интенсивность осадков и т.д. Влияние этих факторов на $[Cl^-]$ анализируется в работе [25].

При разработке модели вероятнее всего будет наблюдаться существенный разброс точек, учитывая множество влияющих факторов, которые невозможно учесть. Это приведет в сложности и даже невозможности получения модели. Тем не менее, в работе [25] представлена модель зависимости $[Cl^-]$ от энергии соленого ветра (W). Наблюдения проводились в течение 43 месяцев. Эта модель получена, прежде всего, благодаря тайфуну в сентябре, следовательно, благодаря экстремальной величине $[Cl^-]$, полученной практически в течение всего 8 часов при отсутствии осадков.

На ГЦКИ с 6 по 9 февраля 2023г наблюдался ураган со скоростью морского ветра до 35 м/с. Поэтому имеет смысл создания модели $[Cl^-]=f(W)$ для данного места. Для разработки модели была использована методика и результаты, представленные в работе [25].

Расчетная скорость осаждения хлоридов на береговой линии $[Cl^-]_o$, мг/(м²·сут) при экспозиции свечи n суток имеет вид, уравнение (6):

$$[Cl^-]_o^{pac} = a \cdot \sum (q_i \cdot V_i \cdot t_i) / n \quad (6)$$

где V_i – средние скорости морских ветров в интервалах: $0 < V_1 \leq 3$ м/с; $3 \text{ м/с} < V_2 \leq 4$ м/с; $4 \text{ м/с} < V_3 \leq 5$ м/с и т.д. для 10 минутных периодов усреднения, t_i – время наблюдения скорости ветра в данном интервале, q_i – производство морских аэрозолей ветром со скоростью для данного интервала, a – величина постоянная для данного места, зависящая от береговой зоны и солености морской воды.

Принимая величину $\sum (q_i \cdot V_i \cdot t_i) / n$ за суммарное среднесуточное производство морских аэрозолей Q , уравнение (6) можно представить в виде уравнения (7):

$$[Cl^-]_o^{pac} = a \cdot Q \quad (7)$$

Для места расположения пробоотборника величина $[Cl^-]^{pac}$ рассчитана с учетом расстояния от берега по экспоненциальному закону, уравнение (8):

$$[Cl^-]^{pac} = [Cl^-]_o^{pac} \exp(-10d) \quad (8)$$

где d – расстояние места от берега, км. Величина $[Cl^-]^{pac}$ должна совпадать с $[Cl^-]^{экс}$.

Использованы также q_i для скоростей ветра до 18 м/с, таблица 6.

Таблица 6. Значения коэффициента q для интервалов скорости морского ветра до 18 м/с.

интервал скорости, м/с	V_i , м/с интервала	q_i
$0 < V \leq 3$	1,5	0,02
$3 < V \leq 4$	3,5	0,03
$4 < V \leq 5$	4,5	0,05
$5 < V \leq 6$	5,5	0,09
$6 < V \leq 7$	6,5	0,12
$7 < V \leq 8$	7,5	0,16
$8 < V \leq 9$	8,5	0,22
$9 < V \leq 10$	9,5	0,30
$10 < V \leq 11$	10,5	0,42
$11 < V \leq 12$	11,5	0,55
$12 < V \leq 13$	12,5	0,85
$13 < V \leq 14$	13,5	1,4
$14 < V \leq 15$	14,5	3
$15 < V \leq 16$	15,5	8
$16 < V \leq 17$	16,5	15,0
$17 < V \leq 18$	17,5	26,0

Для ГЦКИ в уравнении (7) неизвестными являются величины « a », и q_i для интервалов скорости ветра более 18 м/с.

Оценка направлений соленых ветров и величин и значений коэффициента производства морских аэрозолей (q_i) для скорости ветра более 18 м/с

Площадка ГЦКИ расположена на юго-западном берегу Геленджикской бухты. В соответствии с расположением испытательной площадки ГЦКИ (рисунок 7) морскими ветрами для места испытания, расположенного на расстоянии 15 м от берега можно считать ветры в интервале направлений 3° – 120° . Учитывая зоны мелководья, ширину бухты в каждом направлении и направления ветров относительно нормали к береговой линии, интервал соленых ветров будет меньше. Как будет показано ниже, к соленым ветрам отнесены ветры направлений 33° – 90° .

На рисунке 8а представлена диаграмма изменения скорости ветра в период урагана при регистрации с 10-минутным усреднением ветров всех направлений. В период урагана наблюдались ветры со скоростью до 34 м/с в интервалах направлений 212° – 360° и 0° – 88° , рисунок 8а. Из них скорости морских несоленых и морских соленых ветров представлены на рисунке 8б.



Рисунок 7. Расположение испытательной площадки ГЦКИ на берегу бухты. Интервал ветров морских 3° – 120° (—) и морских соленых 33° – 90° (—), нормаль к береговой линии (—).

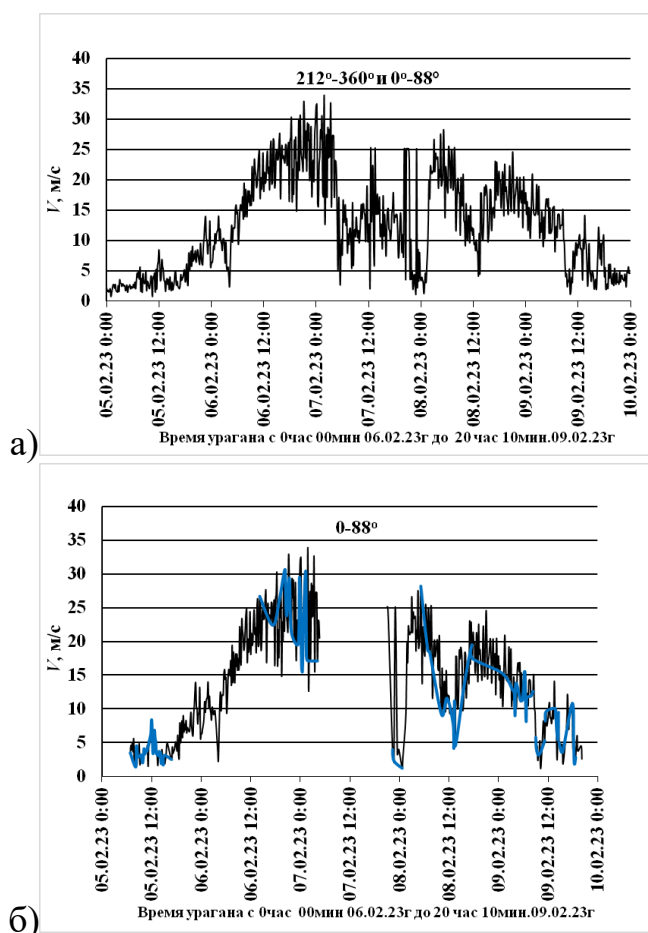


Рисунок 8. Изменения скорости ветров направлений 212° – 360° и 0° – 88° (а) и 0° – 88° , включая несолёные 0° – 32° (—) и солёные 33° – 87° (—) морские ветры (б).

Интервал морских соленых ветров уточнялся на основании одновременного анализа многочисленных вариантов направления соленого ветра и значений коэффициента производства морских аэрозолей (q_i). Уточнение направления соленых ветров и определение величин q_i были сделаны на основании подгонки

величин $[Cl^-]^{pac}$ для места на расстоянии 15 м от берега по уравнениям (7) и (8) с тем, чтобы они соответствовали линейной зависимости от суммарного производства морских аэрозолей (Q). В уравнении (8) величина $\exp(-10d)=0,861$ при $d=0,015$ км.

По результатам исследований наиболее приемлемым является интервал соленых ветров $33^\circ-90^\circ$, а наиболее оптимальные значения величин q_i для интервалов V_i больше 18 м/с представлены в таблице 7 и на рисунке 9.

Таблица 7. Значения коэффициента q_i для интервалов скорости морского ветра от 18 м/с.

интервал скорости, м/с	V_i , м/с интервала	q_i
$18 < V \leq 19$	18,5	38,0
$19 < V \leq 20$	19,5	52,0
$20 < V \leq 21$	20,5	64,0
$21 < V \leq 22$	21,5	72,0
$22 < V \leq 23$	22,5	75,0
$23 < V \leq 24$	23,5	77,0
$24 < V \leq 25$	24,5	78,0
$25 < V \leq 26$	25,5	78,5
$26 < V \leq 27$	26,5	79,0
$27 < V \leq 28$	27,5	79,2
$28 < V \leq 29$	28,5	79,4
$29 < V \leq 30$	29,5	79,6
$30 < V \leq 31$	30,5	79,8
$31 < V \leq 32$	31,5	80,0
$32 < V \leq 33$	32,5	80,0
$33 < V \leq 34$	33,5	80,0
$34 < V \leq 35$	34,5	80,0

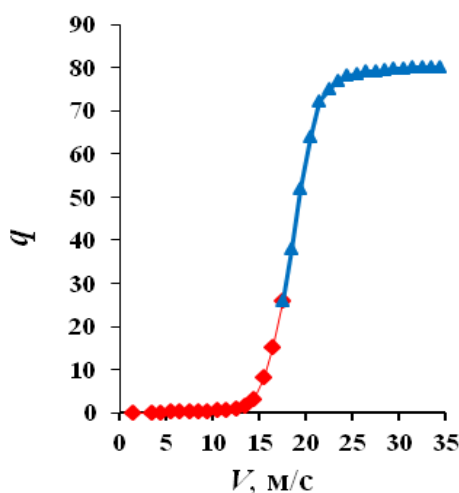


Рисунок 9. Изменение коэффициента производства морских аэрозолей от средней скорости ветра в интервалах скоростей до 18 м/с (◆) по [25] и до 35 м/с для настоящих исследований (▲).

Оценка величины коэффициента a в уравнениях (6)–(8) – величины постоянной для данного места

Для места в 15 м от морского берега по уравнениям (6) и (8) для каждого месячного периода были рассчитаны величины $[Cl^-]^{pac}$. Получена практически линейная зависимость $[Cl^-]^{pac}$ от Q на расстоянии 15 м. На основании полученных $[Cl^-]^{pac}$ определен угловой коэффициент $a = 11,5$, рисунок 10.

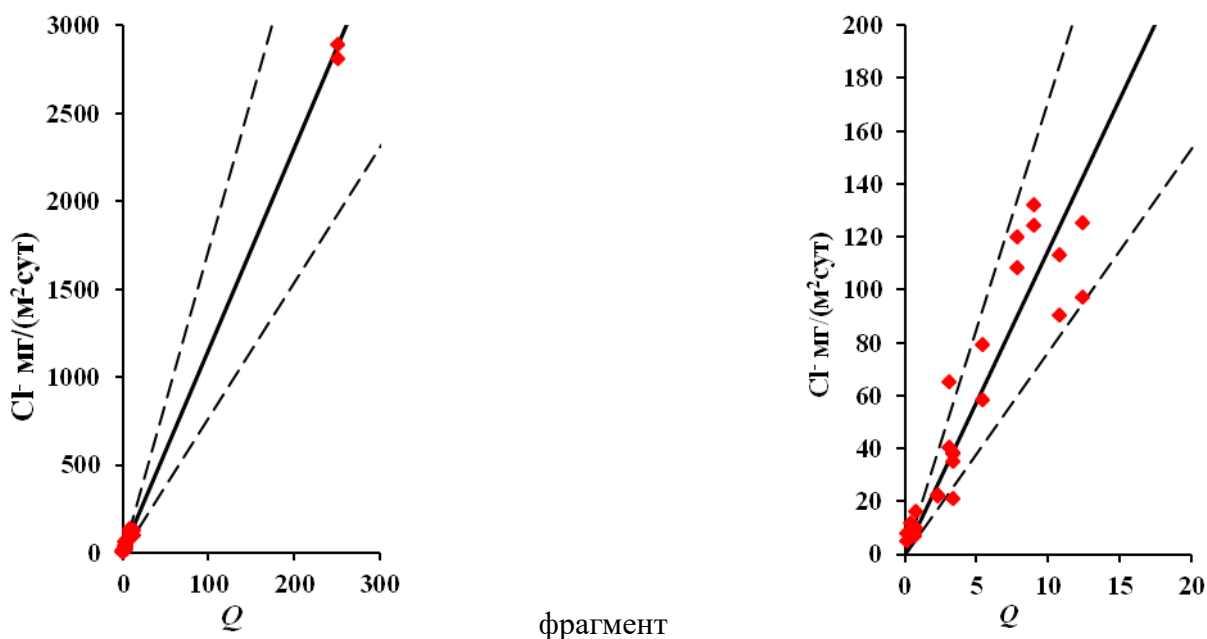


Рисунок 10. Зависимость Cl от величины Q (—). Относительная ошибка -33% – $+50\%$ (---).

Таким образом, расчет величин $[Cl^-]^{pac}$ на расстоянии 15 м от берега возможен по уравнению (9):

$$[Cl^-]^{pac} = 11,5 \cdot Q \cdot 0,861 \quad (9)$$

Сопоставление величин $[Cl^-]^{pac}$ с $[Cl^-]^{экс}$ за месячные и годовые периоды для места на расстоянии 15 м от берега

Среднемесячные скорости осаждения хлоридов рассчитаны с учетом энергии соленых ветров, представленной произведением средней скорости в интервалах $0 < V_1 \leq 3$ м/с; $3 \text{ м/с} < V_2 \leq 4$ м/с; $4 \text{ м/с} < V_3 \leq 5$ м/с и т.д. на коэффициент производства аэрозолей q_i по уравнению (6). Рассчитанные $[Cl^-]^{pac}$ и экспериментальные $[Cl^-]^{экс}$ для 2-х пробоотборников среднемесячные скорости осаждения хлоридов для расстояния от берега 15 м представлены в таблице 8. Относительная ошибка расчета $[Cl^-]^{pac}$ δ (%) дана относительно средних значений $[Cl^-]^{экс}$ двух свечей. Показано, что величина δ в основном не превышает $\pm 33\%$. Высокие значения δ ($\delta = -47,4\%$ и $-69,6\%$) получены для месяцев с незначительными абсолютными величинами $[Cl^-]^{экс}$. Для февраля, когда наблюдался ураган, δ составляет всего $1,5\%$.

Для использования в ФДОН среднегодовые $[Cl^-]^{pac}$ и $[Cl^-]^{экс}$ для обоих годовых

периодов постановки образцов рассчитаны с учетом долей $1/10$ и $1/5$ от $[Cl]^{экс}$ и $[Cl]^{рас}$. Полученные $[Cl]^{рас}$ имеют ошибку расчета, не превышающую 2,2%. Это свидетельствует о возможности использования разработанной модели расчета скорости осаждения хлоридов по режиму соленых ветров.

Таблица 8. Среднемесячные и среднегодовые (с учетом эффективной долей $[Cl]$ в феврале) скорости осаждения хлоридов $[Cl]^{экс}$ и $[Cl]^{рас}$, $мг/(м^2 \cdot сут)$, для места экспозиции на расстоянии 15 м от берега. Ошибка расчета δ , %.

Месяц экспозиции	Свеча 1	Свеча 2	среднее	$[Cl]^{рас}$	δ ,
	$[Cl]^{экс}$	мг/(м ² ·сут)		мг/(м ² ·сут)	%
Июль 22 г.	22,5	21,7	22,1	26,9	21,8
Август 22 г.	58,4	79,1	68,8	62,2	−9,5
Сентябрь 22 г.	132	124,4	128,2	103,5	−19,3
Октябрь 22 г.	34,9	37,9	36,4	39,5	8,4
Ноябрь 22 г.	11,5	7,8	9,7	5,1	−47,4
Декабрь 22 г.	40,2	65,2	52,7	35,9	−31,9
Январь 23 г.	9,8	16	12,9	8,8	−31,8
Февраль 23 г.	2808	2891	2850	2892	1,5
Март 23 г.	97	125	111	142,3	28,2
Апрель 23 г.	6,7	8	7,4	8	8,3
Май 23 г.	113	90	101,5	123,9	22
Июнь 23 г.	38,3	20,7	29,5	39,4	33,6
Июль 23 г.	5	8	6,5	2	−69,6
Август 23 г.	120	108	114	90,7	−20,5
Для февраля доля $[Cl]^{эф}$ от $[Cl]^{экс}$ и $[Cl]^{рас}$	1/10	1 постановка	72,1	73,7	2,2
		2 постановка	74,6	74,0	−0,8
	1/5	1 постановка	95,8	97,8	2,1
		2 постановка	98,3	98,1	−0,2

Выводы

1. Дана оценка удержанной толщины воды продуктами коррозии. Показано, что на поверхности образцов после их годовой экспозиции в открытой атмосфере может удерживаться слой воды высотой от 30–100 мкм на стали до 20–40 мкм на алюминии при наблюдающейся массе удержанных продуктов коррозии.
2. Оценены толщины морской воды, осажденной на поверхность образцов во время тайфуна на ДВКС и урагана в ГЦКИ. Показано, что в каждом конкретном случае для использования высокой/экстремальной скорости осаждения хлоридов, наблюдаемых в месяцы с тайфунами/ураганами, необходимо оценивать толщины выпавших аэрозолей, возможность их стекания с поверхности образцов. Для практических целей необходимо учитывать лишь долю $[Cl]^{эф}$ от скорости осаждения хлоридов на свечу, соответствующую коэффициенту превышения толщины выпавших аэрозолей в сравнении с удерживаемой толщиной.
3. Для ГЦКИ использованы $1/10$ и $1/5$ доли скорости осаждения хлоридов в месяц наблюдения урагана. Несмотря на существенное отличие предполагаемой доли $[Cl]^{эф}$ от $[Cl]^{св}$ в феврале полученные прогнозные величины $K^{пр}$ с

использованием в ФДОН среднегодовых $[Cl]$ с учетом $1/10$ и $1/5$ доли скорости осаждения хлоридов в феврале являются достаточно сопоставимыми с $K^{экс}$ и/или сопоставимыми являются оцененные категории коррозионной агрессивности по $K^{тр}$ с категориями, определенными по $K^{экс}$.

4. Для ГЦКИ благодаря экстремально высоким $[Cl]$ в период урагана разработана модель зависимости скорости осаждения хлоридов от энергии ветра. В основу разработки положена модель, представленная в работе [25]. Для ГЦКИ дана оценка морских соленых ветров, определены q_i для интервалов скорости ветра более 18 м/с и определен коэффициент « a ». Относительная ошибка расчета месячных значений $[Cl]^{pac}$ по модели в основном не превышает $\pm 33\%$, а среднегодовые $[Cl]^{pac}$ для двух годовых периодов имеют ошибки менее $2,2\%$.

Благодарности/Финансирование

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. D. Knotkova, K. Kreislova and S.W. Dean, *ISOCORRAG International Atmospheric Exposure Program: Summary of Results*, ASTM Series 71, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010. doi:[10.1520/DS71-EB](https://doi.org/10.1520/DS71-EB)
2. M. Morcillo, *Atmospheric corrosion in Ibero-America, The MICAT project, Atmospheric corrosion*, ASTM STP 1239, W.W. Kirk and Herbert H. Lawson, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 257–275. doi: [10.1520/STP14924S](https://doi.org/10.1520/STP14924S)
3. B. Chico, D. de la Fuente, I. Díaz, J. Simancas and M. Morcillo, Annual atmospheric corrosion of carbon steel worldwide. An integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT databases, *Mater.*, 2017, **10**, no. 6, 601. doi: [10.3390/ma10060601](https://doi.org/10.3390/ma10060601)
4. M. Morcillo, B. Chico, E. Otero and L. Mariaca, Effect of marine aerosol on atmospheric corrosion, *Mater. Perform.*, 1999, **38**, 72–77.
5. I. Diaz, H. Cano, D. de la Fuente, B. Chico, J.M. Vega and M. Morcillo, Atmospheric corrosion of Ni-advanced weathering steels in marine atmospheres of moderate salinity, *Corros. Sci.*, 2013, **76**, 348–360. doi: [10.1016/j.corsci.2013.06.053](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.06.053)
6. J. Alcántara, B. Chico, I. Díaz, D. de la Fuente and M. Morcillo, Airborne chloride deposit and its effect on marine atmospheric corrosion of mild steel, *Corros. Sci.*, 2015, **97**, 74–88. doi: [10.1016/j.corsci.2015.04.015](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.04.015)
7. A. Castañeda, F. Corvo, D. Fernández and C. Valdés, Outdoor-Indoor Atmospheric Corrosion in a Coastal Wind Farm Located in a Tropical, *Island Engineering Journal*, 2017, **21**, no. 2, doi: [10.4186/ej.2017.21.2.43](https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.2.43)
8. L.G. Franzen, Transport, Deposition and Distribution of Marine Aerosols over Southern Sweden during Dry Westerly Storms, *Ambio*, 1990, **19**, no. 4, 180–188.

-
9. Ю.М. Панченко, А.И. Маршаков, Т.А. Ненашева, Т.Н. Игонин, А.Е. Кутырев, М.А. Фомина и А.И. Вдовин, Коррозионная стойкость конструкционных металлов при разной ориентации образцов на различных расстояниях от морского берега, *Коррозия: защита материалов и методы исследований*, 2024, **2**, no. 2, 29–44. doi: [10.61852/2949-3412-2024-2-2-29-44](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2024-2-2-29-44)
 10. ISO 9225:2012(E). Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres
 11. Y.M. Panchenko, A.I. Marshakov, L.A. Nikolaeva and T.N. Igonin, Development of models for the prediction of first-year corrosion losses of standard metals for territories with a coastal atmosphere in various climatic regions of the world, *Corros. Eng., Sci. Technol.*, 2022, **55**, no. 8, 655–669. doi: [10.1080/1478422X.2020.1772535](https://doi.org/10.1080/1478422X.2020.1772535)
 12. J.A. Jaen, J. Iglesias, C. Hernandez, Analysis of Short-Term Steel Corrosion Products Formed in Tropical Marine Environments of Panama, *Corros.*, 2012, 1–11. doi: [10.1155/2012/162729](https://doi.org/10.1155/2012/162729)
 13. J.A. Jaén, J. Iglesias and O. Adames, Indoor atmospheric corrosion of conventional weathering steels in the tropical atmosphere of Panama, *Hyperfine Interact*, 2014, **224**, 279–288, doi: [10.1007/s10751-013-0826-5](https://doi.org/10.1007/s10751-013-0826-5)
 14. ГОСТ 9.107-2023. Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы. Основные положения.
 15. R. Vera, B.M. Rosales and C. Tapia, Effect of the exposure angle in the corrosion rate of plain carbon steel in a marine atmosphere, *Corros. Sci.*, 2003, **45**, 321–337 doi: [10.1016/S0010-938X\(02\)00071-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(02)00071-9)
 16. Отчет о НИР «Разработка расчетной модели для прогнозирования первогодовых коррозионных потерь металлических материалов, учитывающую мощность нагрузки (энергию) ветров морского направления», ИФХЭ РАН, Москва, 2023 г.
 17. М.Г. Абрамова, Ю.М. Панченко, Е.Ю. Ветрова и Т.А. Ненашева, Коррозионная агрессивность атмосферы в различных климатических районах РФ, *Коррозия: материалы, защита*, 2020, **3**, 12–22. doi [10.31044/1813-7016-2020-0-3-12-22](https://doi.org/10.31044/1813-7016-2020-0-3-12-22)
 18. J. Alcantara, D. de la Fuente, B. Chico, J. Simancas, I. Diaz and M. Morcillo, Marine Atmospheric Corrosion of Carbon Steel: A Review, *Mater.*, 2017, **10**, 406. doi: [10.3390/ma10040406](https://doi.org/10.3390/ma10040406)
 19. I.S. Cole and D.A. Paterson, Possible effects of climate change on atmospheric corrosion in Australia, *Corros. Eng., Sci. Technol.*, 2010, **45**, no. 1, 19–26. doi: [10.1179/147842209X12579401586483](https://doi.org/10.1179/147842209X12579401586483)
 20. I.S. Cole, N.S. Azmat, A. Kanta and M. Venkatraman, What really controls the atmospheric corrosion of zinc? Effect of marine aerosols on atmospheric corrosion of zinc, *Int. Mater. Rev.*, 2009, **54**, no. 3, 117–133. doi: [10.1179/174328009X411145](https://doi.org/10.1179/174328009X411145)
 21. F. Zezza and F. Macri, Marine aerosol and stone decay, *Revista Science of Total Environment*, 1995, **167**, 123–143. doi: [10.1016/0048-9697\(95\)04575-L](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04575-L)

-
22. J.C. Guerra, A. Castañeda, F. Corvo, J.J. Howland and J. Rodríguez, Atmospheric corrosion of low carbon steel in a coastal zone of Ecuador: Anomalous behavior of chloride deposition versus distance from the sea, *Materials and Corros.*, 2018, 1–17. doi: [10.21041/CONPAT2019/V1CC300](https://doi.org/10.21041/CONPAT2019/V1CC300)
 23. D.C. Blanchard and A.H. Woodcock, The production, concentration and vertical distribution of the sea-salt aerosol, *Ann. NY Acad. Sci.*, 1980, **338**, 330–347. doi: [10.1111/j.1749-6632.1980.tb17130.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1980.tb17130.x)
 24. I.S. Cole and D.A. Paterson, Holistic model for atmospheric corrosion Part 5. Factors controlling deposition of salt aerosol on candles, plates and buildings, *Corros. Eng., Sci. Technol.*, 2004, **39**, no. 2, 125–130. doi: [10.1179/147842204225016949](https://doi.org/10.1179/147842204225016949)
 25. Y.M. Panchenko, A.I. Marshakov, L.A. Kudryavtseva, V.V. Kovtanyuk and T.A. Nenasheva, A chloride deposition model for predicting the categories of atmospheric corrosivity in coastal areas. *Corros. Eng., Sci. Technol.*, 2025, **60**, no. 5, 376–389. doi: [10.1177/1478422X241298181](https://doi.org/10.1177/1478422X241298181)

Predictions of first-year corrosion losses of structural metals at extremely high chloride deposition rates

Y.M. Panchenko,^a A.I. Marshakov,^a L.A. Kudryavtseva,^a
V.V. Kovtanyuk,^a T.A. Nenasheva,^a A.A. Rybkina,^a T.N. Igonin,^a
A.I. Vdovin^b and T.V. Koval^b

^a*Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences (IPCE RAS): 31-4, Leninsky prospect, 119071 Moscow, Russia.*

^b*All-Russian Research Institute of Aviation Materials of the National Research Center "Kurchatov Institute" (NRC "Kurchatov Institute" – VIAM), 17 Radio St., Moscow, 105005, Russia*

Abstract

The possibility of predicting the first-year corrosion losses of typical structural metals (carbon steel, zinc, copper, and aluminum) at extremely high rates of chloride deposition on the material surface is shown. The thickness of water retained by metal corrosion products after one-year exposure of samples to the open atmosphere is estimated. It is shown that in order to use the high/extreme rate of chloride deposition observed in months with typhoons/hurricanes, it is necessary to estimate the thickness of the deposited aerosols and the possibility of their flowing off the surface of the samples. To predict one-year corrosion losses of metals, it is necessary to take into account only a fraction of the rate of chloride deposition on the "wet candle" sampler. Based on the data obtained at the NRC "Kurchatov Institute" – VIAM, a model of the rate of chloride deposition was developed taking into account high wind speeds.

Keywords: *atmospheric corrosion, structural metals, predictions, dose-response functions, extreme salinity.*