

УДК 620.193.2

Коррозионная стойкость конструкционных металлов при разной ориентации образцов на различных расстояниях от морского берега

Ю.М. Панченко,^{1*} А.И. Маршаков,¹ Т.А. Ненашева,¹ Т.Н. Игонин,¹
А.Е. Кутырев,² М.А. Фомина² и А.И. Вдовин²

¹Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН), Ленинский просп.31, корп. 4, Москва, 119071 Россия

²Всероссийский 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

Определены скорости осаждения хлоридов на поверхность материала, используя пробоотборники различного типа, и рассчитаны коэффициенты линейной корреляции между данными пробоотборников. Получена экспоненциальная зависимость среднегодовой скорости осаждения хлоридов от расстояния до берега моря. Определены категории коррозионной агрессивности атмосферы при разной ориентации образцов углеродистой стали, цинка, меди и алюминия и на различных расстояниях от берега моря.

Ключевые слова: атмосферная коррозия, конструкционные металлы, ориентация образцов, расстояние от берега, соленость.

Поступила в редакцию 19.04.2024 г.; После доработки 19.04.2024 г.; Принята к публикации 26.04.2024 г.

doi: 10.61852/2949-3412-2024-2-2-29-44

1. Введение

Морская атмосфера из-за наличия в ней соленых аэрозолей является наиболее агрессивной по отношению к металлам. При этом агрессивность атмосферы резко уменьшается с расстоянием от берега моря. Это связано с существенным уменьшением концентрации морских аэрозолей, а, следовательно, и с уменьшением скорости осаждения хлоридов на поверхность материалов [Cl, мг/(м²·сут)]. Например, Коле и соавторы [1] свидетельствуют, что на расстоянии 500 м концентрация аэрозоля уменьшается до 70% от его первоначального значения на береговой линии. Изменение

величины $[Cl]$, связанное с транспортом аэрозолей на суше, зависит от топографии и инфраструктуры мест испытаний и ряда других факторов. Изучению зависимости $[Cl]$ от расстояния до берега моря посвящено много исследовательских работ и обзоров, например, [2–9]. Полученные результаты свидетельствуют, что для относительно ровной поверхности суши данная зависимость может быть аппроксимирована экспоненциальной функцией, но для наклонной поверхности (уклон 30°) на расстоянии до 80 м наблюдается линейное уменьшение $[Cl]$ [10]. Разными авторами предложены статистические модели изменения $[Cl]$ от расстояния от моря, в которых величины коэффициентов получены регрессионным анализом [9, 11–13].

Перенос аэрозоли осуществляется турбулентным потоком воздуха, поэтому осаждение частиц хлоридов на материал происходит как за счет турбулентной диффузии, так и за счет силы тяжести [14–16]. Осаждение хлоридов происходит на горизонтальные, наклонные и вертикальные поверхности. При этом для горизонтальных поверхностей доминирующую роль имеет сила тяжести, а для наклонных и вертикальных поверхностей – турбулентность потока воздуха.

Исследование, представленное в этой статье, преследует двойную цель:

- 1) определить скорость осаждения хлоридов при разной ориентации образцов;
- 2) изучить влияние удаленности образцов от береговой линии на величину годовых коррозионных потерь типовых металлов (K).

2. Методика

Испытания проводились на коррозионных станциях (КС): Северной КС (Дальние Зеленцы, Мурманской обл.) ИФХЭ РАН (далее СКС) и на КС ГЦКИ ВИАМ в г. Геленджик (далее ГЦКИ). СКС расположена на побережье Северного Ледовитого океана (Баренцево море) в холодном (экстремально умеренном) климате ($69^\circ 07' \text{СШ}$, $36^\circ 04' \text{ВД}$) на узком (шириной 0,5–3 км) полуострове, окруженном морской водой с 3-х сторон, Рисунок 1а. Рельеф местности холмистый. Наибольший вынос хлоридов с учетом наименьшего расстояния от береговой линии, ширины каждой губы и рельефа местности возможен при морских ветрах: СВ, ВСВ и от ЮЗ до ССЗ. Море не замерзает. Наименьшее расстояние площадки от моря в направлении СВ, ВСВ составляет 300 метров, высота площадки над уровнем моря 32 метра, испытания проводились в одной точке. ГЦКИ расположена на западном берегу Геленджикской бухты Черного моря ($44^\circ 34' \text{СШ}$, $38^\circ 02' \text{ВД}$). В ГЦКИ испытания проводились в трех точках, расположенных на одной линии на расстояниях 15 (точка 1), 50 (точка 2) и 100 м (точка 3) от береговой линии (Рисунок 1б), высота над уровнем моря (3 м), без уклона, во всех 3-х точках одинаковая.

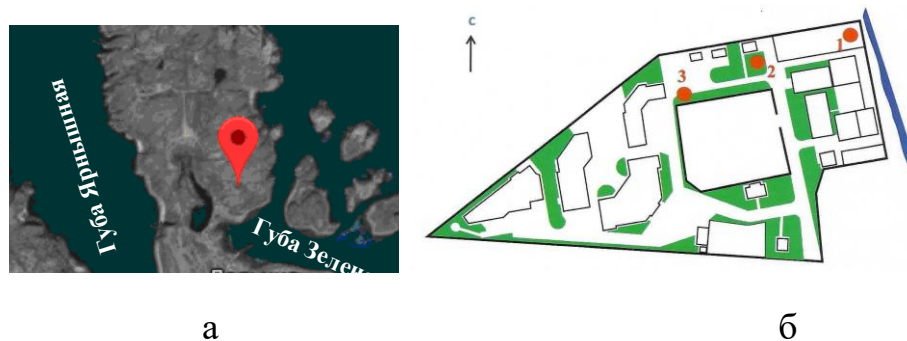


Рисунок 1. Расположение мест испытаний на СКС (а) и в 3-х местах ГЦКИ (б).

Испытывали металлы: сталь Ст3, цинк Ц0, медь М1 и алюминий А5м. Размеры образцов $100 \times 50 \times 2-4$ мм. Годовые испытания проводили с 01.07.2022 г. по 30.06.2023 г. на открытой площадке при установке образцов на стендах под углом 45° к горизонту. Образцы были ориентированы в 2-х направлениях: в ГЦКИ верхней стороной к морю (ССВ) (направление 1) и от моря (ЮЮЗ) (направление 2) и на СКС к морю (СВ) (направление 1) и от моря (ЮЗ) (направление 2). На каждое направление устанавливали по 3 образца каждого металла. Образцы взвешивали до и после испытаний на аналитических весах ViBRA AF-R220CE с точностью до 0,0001 г. Подготовку образцов перед началом испытания и после экспозиции проводили в соответствии с ISO 8407:2021 [17].

В течение всего периода испытаний осуществлялась непрерывная регистрация метеопараметров атмосферы автоматической метеостанцией: температуры ($T^\circ\text{C}$), относительной влажности воздуха (RH , %), продолжительности (час) (τ) и количества (мм) дождей ($Rain$).

Измерение скорости осаждения хлоридов на поверхность материала проводилось двумя методами: методом “влажная свеча” (далее $[Cl]_{\text{св}}$, $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) [18] и методом “влажный чехол” (далее $[Cl]_{\text{чех}}$, $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) [19]. В каждой точке испытаний были установлены по 2 пробоотборника “свеча” и по 1 “чехол”, ориентированных, как и образцы, в 2 –х направлениях. При установке пробоотборников “чехол” верхней стороной к морю обозначали – $[Cl]_{\text{чех1}}$, а от моря – $[Cl]_{\text{чех2}}$.

Для регистрации загрязненности атмосферы сернистым газом $[SO_2, \text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})]$ использовали по 2 щелочные пластины [18]. Все пробоотборники были установлены под навесами. Сроки экспозиции всех пробоотборников составляли 1 мес.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Параметры агрессивности атмосферы.

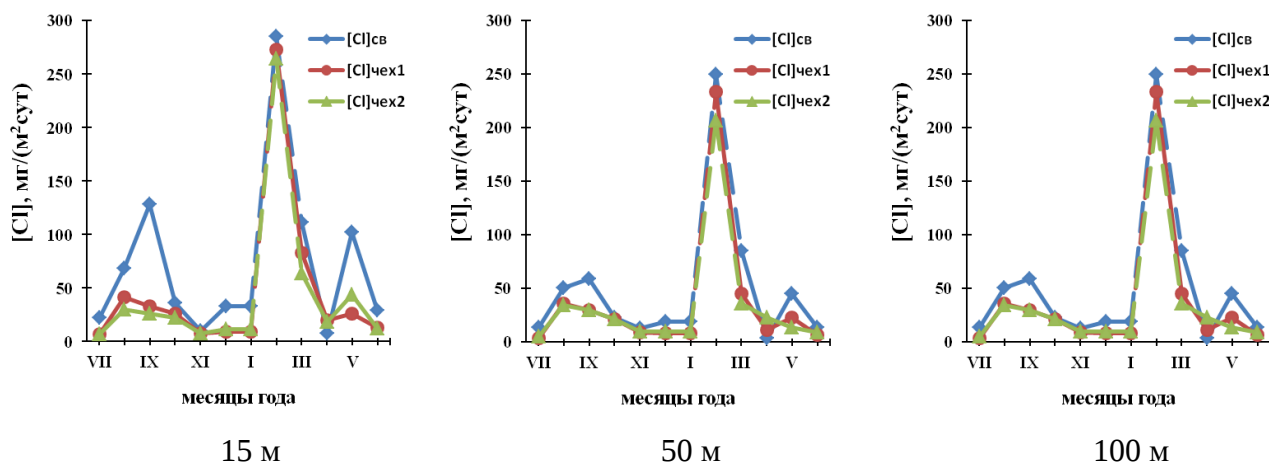
ГЦКИ. Среднегодовые метеорологические и аэрохимические данные атмосферы составили: $T = 15,3^\circ\text{C}$, $RH = 71\%$, $\tau = 418$ часов и $Rain = 578$ мм, $[SO_2] = 1,1 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.

Среднемесечные скорости осаждения хлоридов $[Cl]_{св}$, $[Cl]_{чех1}$ и $[Cl]_{чех2}$ за годовой период экспозиции представлены в Таблице 1.

Таблица 1. ГЦКИ. Скорости осаждения хлоридов на пробоотборники на расстояниях 15 м, 50 м и 100 м от берега.

Период экспозиции	$[Cl]_{чех1}$, мг/(м ² ·сут)			$[Cl]_{чех2}$, мг/(м ² ·сут)			$[Cl]_{св}$ ср., мг/(м ² ·сут)		
	15м	50м	100м	15м	50м	100м	15м	50м	100м
Июль 2022г	7,2	3,9	4,1	7,0	5,4	4,9	22,1	13,4	8,9
Август 2022г	41,6	36,3	22,1	30,1	34,6	25,8	68,7	50,8	33,3
Сентябрь 2022г	33,1	30,1	11,3	25,9	30,2	11,4	128,2	59,5	24,5
Октябрь 2022г	26,1	21,5	11,2	22,3	21,5	12,7	36,4	23,1	14,0
Ноябрь 2022г	23,5	9,3	7,3	7,7	9,6	6,2	9,6	13,0	13,4
Декабрь 2022г	9,0	8,3	5,2	11,5	9,9	5,4	52,7	19,0	9,6
Январь 2023г	9,0	8,3	5,2	11,5	9,9	5,4	12,9	19,0	9,6
Февраль 2023г	2732	2336	1269	2643	2070	1401	2850	2498	1606
Март 2023г	82,9	45,2	14,9	63,8	35,8	15,8	111	85,2	60,5
Апрель 2023г	19,7	11,8	11,0	18,3	23,3	9,4	7,3	3,6	6,7
Май 2023г	26,2	23,2	5,7	43,8	14,0	9,4	102	45,1	17,3
Июнь 2023г	13,1	7,2	2,8	12,3	9	5,1	29,5	13,7	6,3

Изменение величин $[Cl]_{св}$, $[Cl]_{чех1}$ и $[Cl]_{чех2}$ для месячных сроков в каждой точке испытаний представлены на Рис. 2. Величины $[Cl]_{св}$, $[Cl]_{чех1}$ и $[Cl]_{чех2}$ зависят от месяца года их экспозиции, при этом они уменьшаются с увеличением расстояния от берега моря. Высокие скорости осаждения хлоридов наблюдались в сентябре 2022 и марте 2023, особенно в 15 м от берега (точка 1). Аномально высокие скорости осаждения хлоридов в феврале 2023, составляющие от 1270 до 2850 мг/(м²·сут) для 3-х точек, обусловлены ураганом, наблюдавшемся в течение 3-х суток. Данные за февраль, представленные на всех рисунках, уменьшены на порядок величины.



Риснок 2. Величины $[Cl]_{св}$, $[Cl]_{чех1}$ и $[Cl]_{чех2}$ для каждого месяца года на различных расстояниях от берега. Данные для февраля 2023 г. уменьшены в 10 раз. ГЦКИ.

Для всех пробоотборников наблюдается в основном уменьшение $[Cl]$ в зависимости от расстояния от берега, Рисунок 3. Зависимости $[Cl]$ от расстояния имеют разный характер. При больших значениях $[Cl]$ (приблизительно больше $30 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) наблюдается плавное уменьшение на всем расстоянии или существенное уменьшение до 50 м, а потом – более плавное. При небольшой скорости осаждения хлоридов величины $[Cl]$ на расстоянии 15 м меньше, чем на расстояниях 50 м. Это можно объяснить тем, что мелкие частицы аэрозоли турбулентными потоками переносятся на большие расстояния, не оседая на близких расстояниях. Напротив, крупные частицы аэрозоли под действием гравитации в большем количестве оседают на близких расстояниях от берега.

При разных направлениях ветра на осаждение хлоридов на пробоотборники влияют рельеф местности и инфраструктура (строение, растительность и т.д.), препятствующие распространению хлоридов. В связи с этим, зависимости месячных величин $[Cl]$ от расстояния могут различаться. Однако в первом приближении зависимость среднегодовых величин $[Cl]$ от расстояния для всех пробоотборников аппроксимируется экспоненциальной функцией (Рисунок 3) в соответствии с уравнением (1):

$$[Cl] = [Cl]_0 \cdot e^{-10d}, \quad (1)$$

где $[Cl]_0$ – условная скорость осаждения хлоридов на береговой линии, $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, d – расстояние от береговой линии, км.

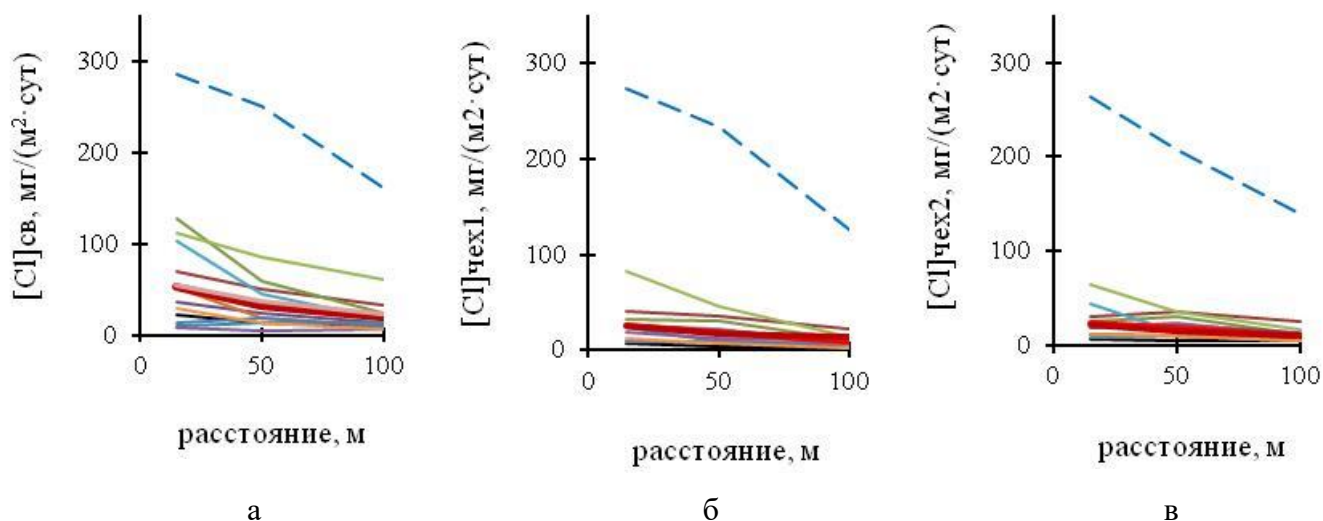


Рисунок 3. Зависимость средних месячных значений $[Cl]_{св}$ (а), $[Cl]_{чех1}$ (б) и $[Cl]_{чех2}$ (в), от расстояния от береговой линии. Данные для февраля 2023г. (— —) уменьшены в 10 раз. Средние значения для всех месяцев без учета февраля 2023г. (—). ГЦКИ.

В Таблице 2 приведены значения величин $[Cl]_0$, средние для 11 месяцев (без учета февраля).

Таблица 2. ГЦКИ. Средние значения величин $[Cl]_0$.

Месяцы	$[Cl]_0$, мг/(м ² ·сут)		
	свеча	чех1	чех2
для всех месяцев	56	30	26
для февраля	3700	3400	3300

В [18] основным методом оценки скорости осаждения хлоридов является метод “влажной свечи”, поэтому целесообразно дать сопоставление значений $[Cl]$, полученных с использованием пробоотборников “влажный чехол”, с величинами $[Cl]$, полученными методом “влажной свечи”. Для февраля все значения $[Cl]$ уменьшены в 10 раз.

На Рисунке 4 представлена зависимость $[Cl]_{чех1}$ и $[Cl]_{чех2}$ от $[Cl]_{св}$, полученные на разных расстояниях от моря в г. Геленджик.

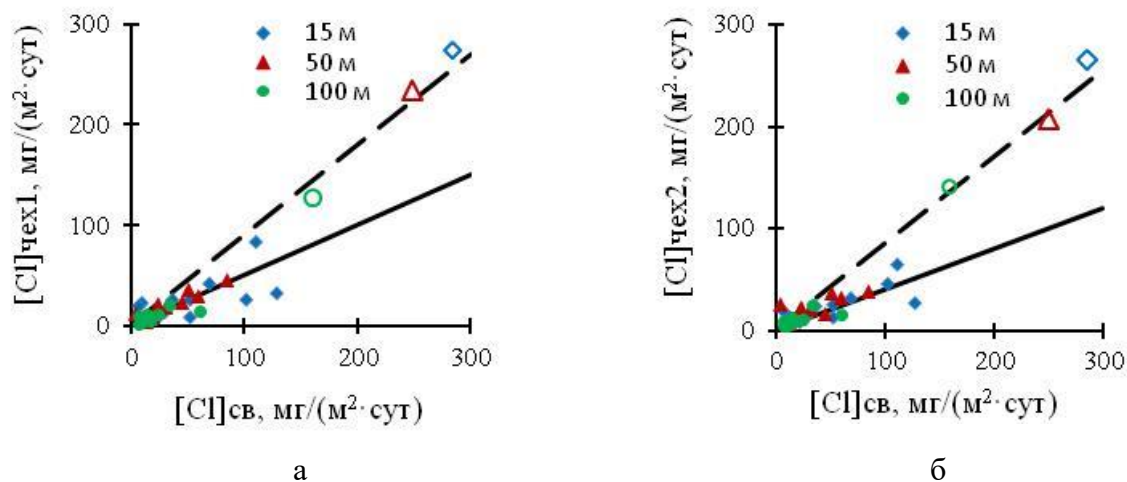


Рисунок 4. Связь $[Cl]_{\text{чех1}}$ (а) и $[Cl]_{\text{чех2}}$ (б) с $[Cl]_{\text{св}}$, полученных для месячных экспозиций пробоотборников на разном расстоянии от береговой линии. 15 м (♦), 50 м (▲) и 100 м (◆). Для февраля 2023г данные $[Cl]$, уменьшенные в 10 раз, для расстояний от береговой линии 15м (◇), 50м (Δ) и 100м (○). ГЦКИ.

Для $[Cl]_{\text{чех1}}$ и $[Cl]_{\text{чех2}}$ величины k соответственно равны 0,55 и 0,45.

При значениях $[Cl]$ до 130 мг/(м²·сут) (Таблица 1) существенный разброс $[Cl]$ на пробоотборниках наблюдается для расстояния 15 м. Но в целом наблюдаются линейные зависимости $[Cl]_{\text{чех1}}$ и $[Cl]_{\text{чех2}}$ от $[Cl]_{\text{св}}$, Уравнение (2) с разными величинами коэффициентов пропорциональности k , Таблица 3.

$$[Cl]_{\text{чех}} = k \cdot [Cl]_{\text{св}} \tag{2}$$

Таблица 3. Значения k по Уравнению (2)

	чех1	чех2
для всех месяцев	0,5	0,4
для февраля	0,9	0,85

Существенное различие величины k для всех месяцев и февраля можно объяснить отличием преобладающих механизмов осаждения хлоридов. При значениях $[Cl]$ до 130 мг/(м²·сут) видимо основным механизмом является турбулентная диффузия. В результате осаждение хлоридов, имеющихся в атмосфере, на свечу наблюдается при всех направлениях ветра, но на чехлы возможно осаждение только при ветрах, направленных к поверхности чехлов. При ветрах, направленных параллельно поверхности пластин, осаждение хлоридов маловероятно. Это приводит к более высокому значению $[Cl]$ на свече. При высоких $[Cl]$ (в данном случае более 1200 мг/(м²·сут)), (Таблица 1) на наклонные поверхности чехлов осаждается большее количество грубых аэрозолей за счет гравитации в сравнении с осаждением при турбулентной диффузии. Во время урагана морской ветер был направлен к плоскости

чехлов. В результате отличие величин $[Cl]$ на чехлах и свече незначительное, значения k близко к 1.

Полученные результаты свидетельствуют, что, несмотря на их различную ориентацию верхней стороны к берегу, значения величин $[Cl]$ достаточно сопоставимы для всех месяцев, включая февраль, Рисунок 5. Коэффициент пропорциональности составляет 0,94. Это возможно при практически одинаковой скорости осаждения хлоридов на поверхности чехлов при турбулентной диффузии и за счет гравитации.

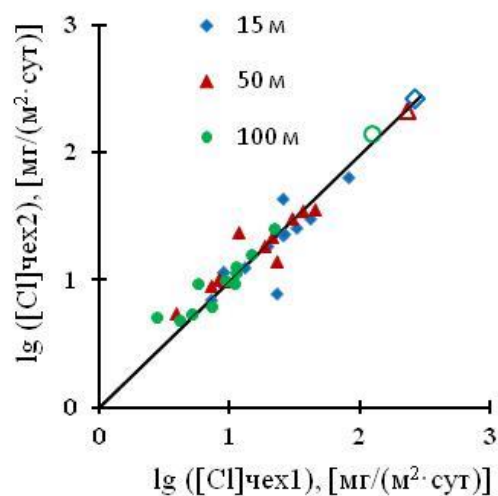


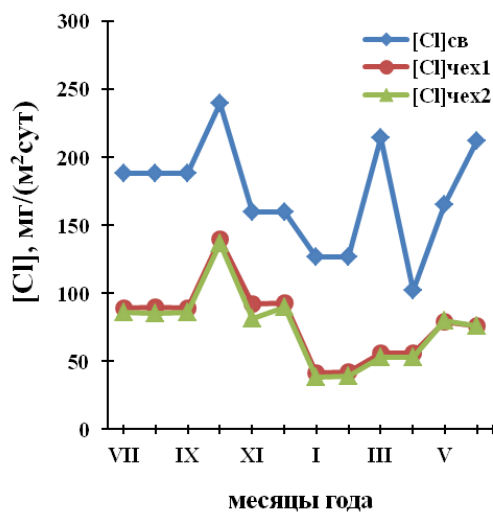
Рисунок 5. Связь $[Cl]_{\text{чех2}}$ с $[Cl]_{\text{чех1}}$, полученных для месячных экспозиций пробоотборников на расстояниях от береговой линии 15 м (♦), 50 м (▲) и 100 м (◆). Для февраля 2023 г. данные $[Cl]$, уменьшенные в 10 раз, для расстояний от береговой линии 15 м (◇), 50 м (△) и 100 м (○).

СКС. Среднегодовые метеорологические и аэрохимические данные атмосферы составили: $T = 3,1^\circ\text{C}$, $RH = 79\%$, $\tau = 371$ час и $Rain = 65$ мм, $[SO_2] = 2,4$ мг/(м²·сут). Среднемесячные скорости осаждения хлоридов $[Cl]_{\text{св}}$, $[Cl]_{\text{чех1}}$ и $[Cl]_{\text{чех2}}$ за годовой период экспозиции представлены в Таблице 4 и на Рисунке 6. Как видим, величины $[Cl]_{\text{св}}$, $[Cl]_{\text{чех1}}$ и $[Cl]_{\text{чех2}}$ (Рисунок 6), полученные на СКС, тоже зависят от месяца их экспозиции. Высокие скорости осаждения хлоридов наблюдались в октябре 2022 г.

Связи месячных величин $[Cl]_{\text{чех1}}$ и $[Cl]_{\text{чех2}}$ с $[Cl]_{\text{св}}$ в зависимости от направления их установки представлены на Рисунке 7. Наблюдается практически полное совпадение $[Cl]_{\text{чех1}}$ и $[Cl]_{\text{чех2}}$, что свидетельствует об одинаковой скорости осаждения $[Cl]$ на пробоотборники не зависимо от направления их установки. Для полученной линейной зависимости $k = 0,4$ (Рисунок 7).

Таблица 4. СКС. Скорости осаждения хлоридов на пробоотборники

Период экспозиции	[Cl]чех1, мг/(м ² ·сут)	[Cl]чех2, мг/(м ² ·сут)	[Cl]св ср., мг/(м ² ·сут)
Июль 2022г	89,3	85,7	188
Август 2022г	90,0	85,0	188
Сентябрь 2022г	89,1	86,0	188
Октябрь 2022г	140	137	240
Ноябрь 2022г	92,5	91,5	160
Декабрь 2022г	93,0	90,0	160
Январь 2023г	41,5	38,5	127
Февраль 2023г	42	39	127
Март 2023г	56	53	214
Апрель 2023г	56	53	102
Май 2023г	79	80	165
Июнь 2023г	76	76	212

**Рисунок 6.** Величины [Cl]св, [Cl]чех1 и [Cl]чех2 для каждого месяца года. СКС.

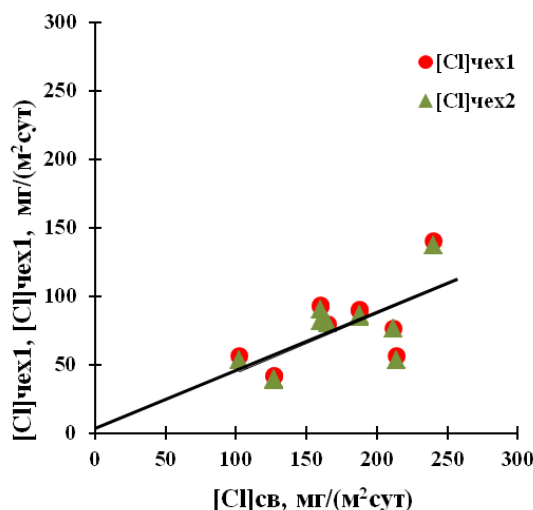


Рисунок 7. Соотношения $[Cl]_{чех1}$ и $[Cl]_{чех2}$ с $[Cl]_{св}$ для месячных экспозиций пробоотборников. СКС.

3.2. Коррозионная стойкость металлов

Определены средние значения потери массы 3-х образцов металлов при различной ориентации образцов в каждом пункте испытаний. Первогодовые коррозионные потери металлов в ГЦКИ даны в Таблице 5, а на СКС – в Таблице 6. Категории коррозионной агрессивности атмосферы определялись согласно ГОСТ 9.107-2023 [20].

Как видим, в ГЦКИ категории коррозионной агрессивности атмосферы, определенные по K , совпадают, в основном, для образцов обоих направлений во всех точках испытаний (Таблица 5). По отношению к стали, цинку и алюминию агрессивность атмосферы соответствует категории С3. Исключениями являются: для стали (2-направление, 100 м – категория С2) и для алюминия (2-е направление, 15 м – категория С4). Категории коррозионной агрессивности атмосферы по отношению к меди – С4 и С5.

На СКС различные категории коррозионной агрессивности атмосферы: С3 (для стали и цинка), С4 (для меди), С4 и С5 (для алюминия).

Зависимости K от расстояния до берега моря (ГЦКИ) представлены на Рисунке 8, направление 1 – лицевая (верхняя) сторона образцов направлена к преобладающим морским ветрам, направление 2 – нижняя сторона образцов обращена к преобладающим морским ветрам. Первогодовые коррозионные потери металлов при обоих направлениях ориентации образцов снижаются с увеличением расстояния от берега моря. Однако, экспоненциальная зависимость K от d наблюдается не во всех случаях. Для стали и алюминия экспоненциальная зависимость ярко выражена, но для меди зависимость K от d практически линейная. Для цинка зависимость средних значений K от d также близка к линейной из-за относительно большого значения K образцов, установленных на расстоянии 50 м верхней стороной от моря (по-видимому,

это значение K является ошибочным). Возможно, что отклонение от экспоненциальной зависимости K меди от d связано с не учетом факторов, влияющих на время увлажнения поверхности металла, например, солнечной радиации и температуры поверхности образцов.

Таблица 5. ГЦКИ. Первогодовые коррозионные потери металлов, г/м² и категории коррозионной агрессивности атмосферы на разных расстояниях от берега моря при различной ориентации образцов.

Расстояние	1 направление		2 направление	
	K , г/м ²	Категория	K , г/м ²	Категория
Ст3				
15 м	329,46	C3	249,82	C3
50 м	259,22	C3	200,38	C3
100 м	214,45	C3	190,06	C2
Ц0				
15 м	7,88	C3	6,91	C3
50 м	5,92	C3	7,26	C3
100 м	5,68	C3	5,28	C3
М1				
15 м	28,30	C5	31,09	C5
50 м	22,92	C4	26,13	C5
100 м	15,89	C4	16,49	C4
A5м				
15 м	1,79	C3	2,63	C4
50 м	1,22	C3	1,87	C3
100 м	0,64	C3	1,29	C3

Таблица 6. СКС. Первогодовые коррозионные потери металлов, г/м² и категории коррозионной агрессивности атмосферы при различной ориентации образцов.

Металл	1 направление		2 направление	
	K , г/м ²	Категория	K , г/м ²	Категория
Ст3	270	C3	276	C3
Ц0	8,68	C3	9,31	C3
М1	19,55	C4	16,83	C4
A5м	5,52	C5	4,12	C4

Влияние ориентации образцов на скорость их коррозии неоднозначное: значения K стали больше у образцов, установленных верхней стороной к морю, на алюминиевых образцах наблюдается обратный эффект. Для цинка и меди значения K образцов с разной ориентацией достаточно близки. Для выяснения причин различного влияния ориентации образцов на скорость их коррозии необходимы дополнительные исследования и, прежде всего, определение скорости удержания хлоридов на разных поверхностях металлов.

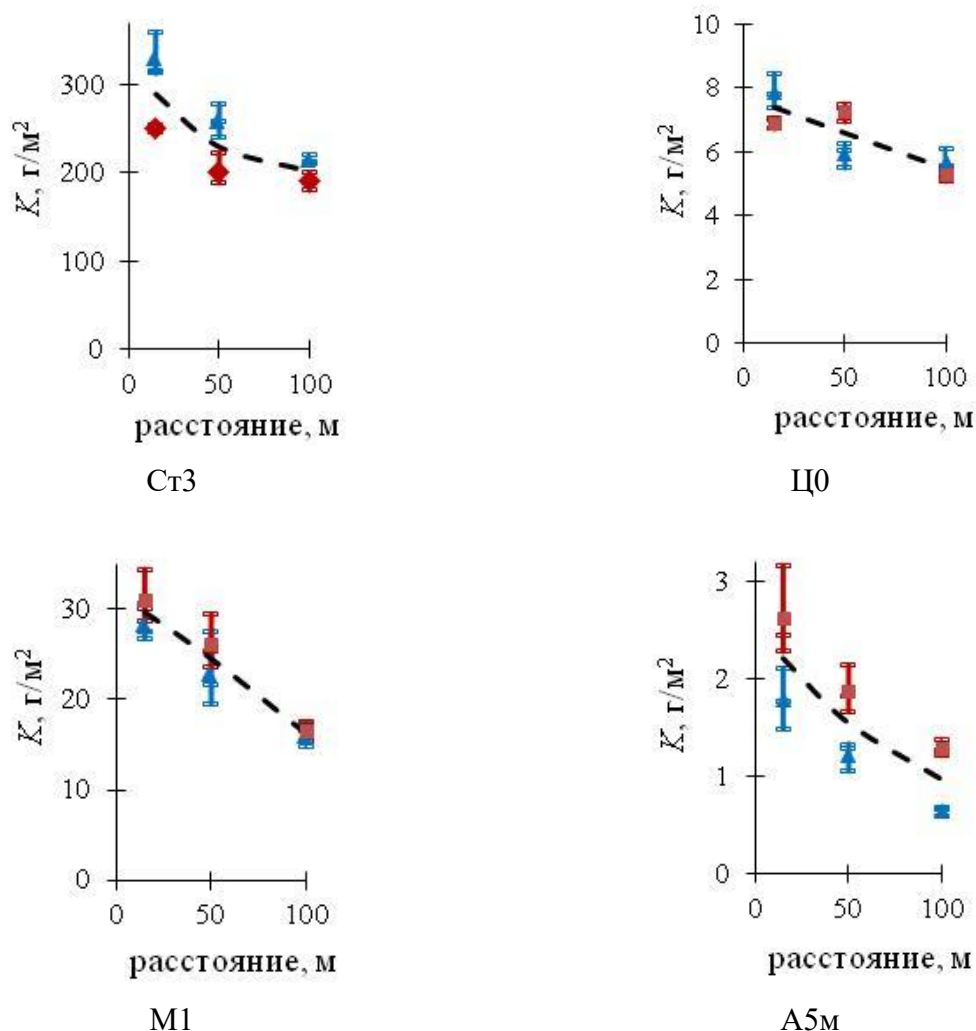


Рисунок 8. Коррозионные потери металлов за первый год экспозиции в ГЦКИ при установке образцов верхней стороной к морю (направление 1) ($\blacktriangle$) и от моря (направление 2) ($\blacklozenge$). Зависимость средних значений K для двух направлений от расстояния до берега (— — —).

Измерения проведены на приборах ЦКП ФМИ ИФХЭ РАН.

Выводы

1. Определены скорости осаждения хлоридов на влажную свечу $[Cl]_{св}$ и на влажные чехлы, имеющие ориентацию верхней стороной к морю $[Cl]_{чех1}$ и от моря $[Cl]_{чех2}$. Показано, что скорость осаждения хлоридов отличается в зависимости от вида пробоотборника. Наибольшее значение $[Cl]_{св}$ объяснено осаждением хлоридов, поступающих на цилиндрическую вертикальную поверхность свечи при ветрах всех направлений. На чехлах осаждения хлоридов происходит при ветрах, направление которых близко к перпендикуляру к плоскости пробоотборника.
2. Показано, что для каждого пробоотборника наблюдается уменьшение $[Cl]$ с расстоянием от береговой линии. Уменьшение среднегодовых $[Cl]$ с расстоянием от моря можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью.
3. Показана линейная связь $[Cl]_{чех}$ с $[Cl]_{св}$. Рассчитаны величины коэффициентов связи $[Cl]_{чех}$ с $[Cl]_{св}$ для скорости осаждения хлоридов до $120 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ и свыше $1200 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, а также связи $[Cl]_{чех1}$ с $[Cl]_{чех2}$.
4. Используя годовые коррозионные потери K типовых конструкционных металлов при различной ориентации образцов к морю, определены категории коррозионной агрессивности атмосферы для ГЦКИ ВИАМ (г. Геленджик) и СКС ИФХЭ РАН (п. Дальние Зеленцы).
5. Показаны изменения K типовых конструкционных металлов от расстояния до берега моря.

Список литературы

1. I.S. Cole, D.A. Paterson, W.D. Ganther, A. Neufeld, B. Hinton, G. McAdam, M. McGeachie, R. Jeffery, L. Chotimongkol, C. Bhamornsut, N.V. Hue and S. Purwadaria, Holistic model for atmospheric corrosion – Part 3 – Effect of natural and man made landforms on precipitation of marine salts in Australia and south-east Asia, *Corros. Eng. Sci. Technol.*, 2003, **38**, no. 4, 267–274. doi: [10.1179/147842203225008921](https://doi.org/10.1179/147842203225008921)
2. M.J. Ten Harkel, The effects of particle-size distribution and chloride depletion of sea-salt aerosols on estimating atmospheric precipitation at a coastal site, *Atmos. Environ.*, 1997, **31**, no. 3, 417–427. doi: [10.1016/S1352-2310\(96\)00249-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(96)00249-X)
3. M. Morcillo, B. Chico, E. Otero and L. Mariaca, Effect of marine aerosol on atmospheric corrosion, *Mater. Perform.*, 1999, **38**, 72–77.
4. S. Feliu, M. Morcillo and B. Chico, Effect of distance from sea on atmospheric corrosion rate, *Corrosion*, 1999, **55**, no. 9, 883–891. doi: [10.5006/1.3284045](https://doi.org/10.5006/1.3284045)
5. I.S. Cole, W.D. Ganther, D.A. Paterson, G.A. King, S.A. Furman and D. Lau, Holistic model for atmospheric corrosion – Part 2. Experimental measurement of precipitation of marine salts in a number of long range studies, *Corros. Eng. Sci. Technol.*, 2003, **38**, no. 4, 259–266. doi: [10.1179/147842203225008886](https://doi.org/10.1179/147842203225008886)

6. I.S. Cole, W.Y. Chan, G.S. Trinidad and D.A. Paterson, Holistic model for atmospheric corrosion – Part 4. Geographic information system for predicting airborne salinity, *Corros. Eng. Sci. Technol.*, 2004, **39**, no. 1, 89–96. doi: [10.1179/147842204225016831](https://doi.org/10.1179/147842204225016831)
7. G.R. Meira, M.C. Andrade, I.J. Padaratz, M.C. Alonso and J.C. Borba, Measurements and modelling of marine salt transportation and precipitation in a tropical region in Brazil, *Atmos. Environ.*, 2006, **40**, no. 29, 5596–5607. doi: [10.1016/j.atmosenv.2006.04.053](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.04.053)
8. H. Guan, A.J. Love, C.T. Simmons, O. Makhnin and A.S. Kayaalp, Factors influencing chloride deposition in a coastal hilly area and application to chloride deposition mapping, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2010, **14**, 801–813. doi: [10.5194/hess-14-801-2010](https://doi.org/10.5194/hess-14-801-2010)
9. 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)
10. M. Vacek, V. Křivý, K. Kreislová, M. Vlachová and M. Kubzová, Experimental Measurement of Deposition Chloride Ions in the Vicinity of Road Cut, *Materials*, 2023, **16**, no. 1, 88. doi: [10.3390/ma16010088](https://doi.org/10.3390/ma16010088)
11. J.J.S. Lee and H.J. Moon, Salinity distribution of seashore concrete structures in Korea, *Building and Environment*, 2006, **41**, no. 10, 1447–1453. doi: [10.1016/j.buildenv.2005.05.030](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.030)
12. G.R. Meira, C. Andrade, C. Alonso, J.C. Borba and M. Padilha, Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator, *Cement & Concrete Composites*, 2010, **32**, no. 6, 427–435. doi: [10.1016/j.cemconcomp.2010.03.002](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.03.002)
13. A. Castañeda, J. J. Howland Albear, F. Corvo and R. Marrero, Estudio de la agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado en La Habana, *Rev. Lat. Met. Mater.*, 2015, **35**, no. 2, 173–188.
14. I.S. Cole, D.A. Paterson and W.D. Ganther, Holistic model for atmospheric corrosion. Part 1. Theoretical framework for production, transportation and deposition of marine salts, *Corros. Eng., Sci. Technol.*, 2003, **38**, no. 2, 129–134. doi: [10.1179/147842203767789203](https://doi.org/10.1179/147842203767789203)
15. I.S. Cole and D.A. Paterson, Holistic model for atmospheric corrosion. Part 5. Factors controlling precipitation 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)
16. I.S. Cole, D.A. Paterson and D. Lau: in book “*Physical techniques in the study of art, archaeology and cultural heritage*”, (ed. D. Creagh and D. Bradley), Amsterdam, Elsevier, 2007, Chap. 3, 115–153.
17. ISO 8407:2021. Corrosion of metals and alloys - Removal of corrosion products from corrosion test specimens. International Standards Organization.
18. ISO 9225-2012. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres. International Standards Organization, Geneva, 2012.

-
19. Y. Panchenko, A. Marshakov, L. Nikolaeva and T. Igonin, Corrosion resistance of structural metals depending on the sample orientation and initial exposure conditions in coastal and rural atmospheres. Part 1. Corrosivity toward structural metals at coastal and rural test sites under various exposure conditions, *Corros. Eng., Sci. Technol.*, 2020, 55, no. 8, 655–669. doi:[10.1080/1478422X.2020.1772535](https://doi.org/10.1080/1478422X.2020.1772535)
 20. ГОСТ-9.107-2023. Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы. Основные положения.

Corrosion resistance of structural metals with different sample orientations at different distances from the seashore

Y.M. Panchenko,¹ A.I. Marshakov,¹ T.A. Nenasheva,¹ T.N. Igonin,¹
A.E. Kutyrev,² M.A. Fomina,² A.I. Vdovin²

¹A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry,
Russian Academy of Sciences, Leninsky pr. 31, 119071 Moscow, Russian Federation

²All-Russian Research Institute of Aviation Materials of the National Research Center
“Kurchatov Institute” (NRC “Kurchatov Institute” - VIAM), 17 Radio St., Moscow,
105005, Russia

*E-mail: panchenkoyum@mail.ru

Abstract

The rates of chloride deposition on the surface of the material were determined using different types of samplers, and linear correlation coefficients between the sampler data were calculated. An exponential dependence of the average annual rate of chloride deposition on the distance to the seashore was obtained. The categories of corrosive aggressiveness of the atmosphere were determined for different orientations of samples of carbon steel, zinc, copper and aluminum and at different distances from the seashore.

Keywords: *atmospheric corrosion, structural metals, sample orientation, distance from shore, salinity.*