

УДК 620.193

## **История развития коррозионных исследований металлов в ИФХЭ РАН. Прогнозирование коррозионных потерь конструкционных металлов в атмосфере и картографирование континентальной территории РФ по коррозионным потерям металлов за разные сроки**

**Ю.М. Панченко и А.И. Маршаков\***

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

*\*E-mail: [a\\_marshakov@mail.ru](mailto:a_marshakov@mail.ru)*

### **Аннотация**

Рассмотрены результаты работ, выполненных в лаборатории коррозии металлов в природных условиях в течение последних 20 лет в области прогнозирования атмосферной коррозии металлов. Модели атмосферной коррозии были созданы на основе статистической обработки данных о коррозионных потерях массы типовых металлов (углеродистой стали, цинка, меди и алюминия), полученных при проведении крупных международных и российских программ натуральных коррозионных испытаний материалов. С помощью разработанных моделей можно оценить категорию агрессивности атмосферы по отношению к данному типовому металлу, предсказать коррозионную стойкость при его длительной эксплуатации в различных климатических условиях, разработать карты территорий в различных географических масштабах по коррозионным поражениям металла за разные периоды времени.

**Ключевые слова:** *атмосферная коррозия, типовые металлы, категории агрессивности, функции доза–ответ, долговременное прогнозирование, картографирование.*

Поступила в редакцию 10.04.2026 г. После доработки 13.04.2026 г.; Принята к публикации 13.04.2026 г.

doi: [10.61852/2949-3412-2026-4-2-176-211](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2026-4-2-176-211)

### **Введение**

Атмосферная коррозия металлов (АКМ) является наиболее распространенным видом разрушения металлических систем. Необходимым требованием при проектировании металлических конструкций являются сведения о коррозионной устойчивости

материалов в различных климатических зонах и типах атмосфер за разные периоды времени. Для практических целей интерес представляет корректная оценка первогодовых коррозионных потерь ( $K_1$ ) металлов, по которым определяются категории коррозионной агрессивности атмосферы. Для каждой категории коррозионной агрессивности атмосферы в соответствии с нормативными документами проектировщики предусматривают толщину металла изделий, методы и средства их защиты или консервации. Практическое значение имеют также сведения о долговечности металлических изделий в различных климатических условиях. Без проведения длительных коррозионных натуральных испытаний в местах эксплуатации металлических сооружений эти данные можно получать с использованием разработанных моделей, обеспечивающих достоверные предсказания коррозионных поражений ( $K$ ) за разные периоды времени в любом месте. Полученные результаты прогнозирования  $K_1$  и  $K$  являются основой для картографирования территорий в различных географических масштабах по коррозионным потерям/поражениям за разные периоды времени.

Основой для создания моделей служат результаты атмосферных испытаний и данные коррозионной агрессивности окружающей среды в местах экспозиции материалов. АКМ представляет пример большой, плохо организованной системы, в которой не все связи строго детерминированы и не все определяющие факторы тесно взаимодействующих процессов могут быть учтены. Особенностью воздушной атмосферы является то, что ее параметрам не свойственны постоянные значения. Они меняются с определенной регулярностью во времени (суточные и сезонные изменения) и в пространстве (формирование климатических зон, ближний и дальний перенос коррозионных газов). При анализе метеорологических и аэрохимических параметров атмосферы используют усредненные среднегодовые значения величин. Характеристики климатических факторов, воздействующих на коррозию, описаны П.В. Стрекаловым и др. [1, 2].

Для разработки математических моделей прогноза  $K_1$  необходима большая база данных первогодовых коррозионных потерь металлов и параметров агрессивности атмосферы в периоды проведения натуральных испытаний. Коррозионные испытания, проведенные в зонах с тропическим и субтропическим климатом, расширили базу характеристик климатических факторов, воздействующих на коррозию, что показано А.А. Михайловым и др. [3, 4]. История развития атмосферных коррозионных исследований, проводимых в ИФХ АН, в последующем ИФХЭ РАН, с 1945 по 2005 г., изложена в работах П.В. Стрекалова и др. [5, 6]. Моделирование атмосферной коррозии металлов с использованием математических моделей, называемых функция доза–ответ (ФДО), и картографирование территорий разных стран впервые осуществлено А.А. Михайловым и др. [7], а история развития моделирования в ИФХЭ РАН этими авторами описана в работе [8].

Необходимо отметить большой вклад, внесенный А.А. Михайловым в разработку ФДО и картографирование территорий по коррозионным потерям металлов, его энтузиазм. Он являлся членом комиссии по обработке базы данных, полученных при проведении коррозионных испытаний по трем международным программам, в местах мира с разным климатом и загрязненностью атмосферы, участвовал в разработке ФДО, включенных в международный стандарт. В 2008 году А.А. Михайлов начал писать книгу «Атмосферная коррозия и защита металлов», которая включала физико-химические основы атмосферной коррозии, развитие математических моделей для прогноза первогодových и долговременных коррозионных потерь, картографирование территорий, защиту металлов от атмосферной коррозии ингибиторами, конверсионными, лакокрасочными и гальваническими покрытиями и ряд других вопросов. В книге по всем темам он предполагал использовать данные, полученные по всему миру. К сожалению, А.А. Михайлов написал практически полностью лишь первые 3 главы. Для остальных глав был написан лишь план их изложения. После его ухода из жизни в 2010 году, написание книги продолжили Ю.М. Панченко и Ю.И. Кузнецов [9].

Несмотря на достижения в области создания моделей для предсказания первогодových и долговременных коррозионных потерь конструкционных металлов, представленных соответственно в международных стандартах [10] и [11], появилась насущная необходимость разработки новых моделей для более точного прогнозирования потерь металлов на территории РФ.

### **Модели для предсказания первогодových коррозионных потерь конструкционных металлов**

В период 1987–1995 гг. были осуществлены 3 крупные международные программы натуральных атмосферных испытаний материалов. По программе ИСОКОРРАГ 4–6-летние испытания проведены на 52 коррозионных станциях в Англии, Аргентине, Германии, Испании, Канаде, Новой Зеландии, Норвегии, СССР, США, Финляндии, Чехословакии, Швеции и Японии [12]. В рамках этой программы ИФХ АН СССР проводил испытания на Северной, Звенигородской и Дальневосточной коррозионных станциях, а также на временных коррозионных площадках в Антарктиде и Оймяконе. По программе ЕЭК ООН [13, 14] 3–4-летние испытания проводились в 39 местах стран Европы (Чехословакия, Финляндия, Германия, Нидерланды, Норвегия, Швеция, Испания, СССР), а также в Канаде и США. По латиноамериканскому проекту МІСАТ (Аргентина, Бразилия, Венесуэла, Колумбия, Коста-Рика, Куба, Испания, Мексика, Панама, Перу, Португалия, Уругвай, Чили и Эквадор) 3–4-летние испытания проведены в 73 местах [15, 16]. По результатам этих испытаний, охвативших все разнообразие климатических параметров атмосферы мира и широкий интервал аэрохимических параметров, получены обширная база данных коррозионных потерь металлов за первый год экспозиции и параметров агрессивности атмосферы в период

испытаний. По полученным результатам разработаны модели (ФДО) для прогноза первогодových коррозионных потерь металлов, уравнения (1)–(4), представленные в международном стандарте [10] (далее ФДОС).

Для углеродистой стали:

$$r_{\text{корр}} = 1,77 \cdot P_d^{0,52} \cdot \exp(0,020RH + f_{St}) + 0,102 \cdot S_d^{0,62} \cdot \exp(0,033RH + 0,040T), \quad (1)$$

где  $f_{St} = 0,150 \cdot (T - 10)$  при  $T \leq 10^\circ\text{C}$ ; при  $T > 10^\circ\text{C}$   $f_{St} = -0,054 \cdot (T - 10)$ ;  $r_{\text{корр}}$  – скорость коррозии металла за первый год, мкм/год;  $T$  – среднегодовая температура,  $^\circ\text{C}$ ;  $RH$  – средняя относительная влажность, %;  $P_d$  – среднегодовое осаждение  $\text{SO}_2$ , мг/( $\text{м}^2 \cdot \text{сут}$ );  $S_d$  – среднегодовое осаждение  $\text{Cl}^-$ , мг/( $\text{м}^2 \cdot \text{сут}$ ).

Для цинка:

$$r_{\text{корр}} = 0,0129 \cdot P_d^{0,44} \cdot \exp(0,046RH + f_{Zn}) + 0,0175 \cdot S_d^{0,57} \cdot \exp(0,008RH + 0,085T), \quad (2)$$

где  $f_{Zn} = 0,038 \cdot (T - 10)$  при  $T \leq 10^\circ\text{C}$ ; при  $T > 10^\circ\text{C}$   $f_{Zn} = -0,071 \cdot (T - 10)$ .

Для меди:

$$r_{\text{корр}} = 0,0053 \cdot P_d^{0,26} \cdot \exp(0,059RH + f_{Cu}) + 0,01025 \cdot S_d^{0,27} \cdot \exp(0,036RH + 0,049T), \quad (3)$$

где  $f_{Cu} = 0,126 \cdot (T - 10)$  при  $T \leq 10^\circ\text{C}$ ; при  $T > 10^\circ\text{C}$   $f_{Cu} = -0,080 \cdot (T - 10)$ .

Для алюминия:

$$r_{\text{корр}} = 0,0042 \cdot P_d^{0,73} \cdot \exp(0,025RH + f_{Al}) + 0,0018 \cdot S_d^{0,60} \cdot \exp(0,020RH + 0,094T), \quad (4)$$

где  $f_{Al} = 0,009 \cdot (T - 10)$  при  $T \leq 10^\circ\text{C}$ ; при  $T > 10^\circ\text{C}$   $f_{Al} = -0,043 \cdot (T - 10)$ .

Во многих странах международный стандарт принят в качестве государственного, в том числе, и в России, но впоследствии ГОСТ ISO 9223-2017 был отменен в связи с введением ГОСТ 9.107-2023.

Рассчитанные (предсказанные) по ФДОС первогодových коррозионные потери металлов ( $K_1^{\text{пр}}$ ) для 30 мест, расположенных от Заполярья до юга Приморского края [17], оказались весьма недостоверными. Это послужило поводом создания для территории России новых ФДО (далее ФДОН).

В основу ФДОН были положены ФДОС. Это связано с тем, что в ФДОС использованы среднегодовые параметры атмосферы  $T$  и  $RH$ , регистрируемые на всех метеостанциях мира. Возможность использования этих параметров вместо времени существования на поверхности металла пленки влаги, определяемого по суммарному времени, в течение которого  $RH \geq 80\%$  при  $T \geq 0^\circ\text{C}$ , доказана исследователями J. Tidblad, A.A. Mikhailov и V. Kusera [18]. Кроме того, в ФДОС учтено сложное влияние температуры: рост коррозионных потерь с повышением  $T$  до некоторого предела  $T_{\text{lim}} \sim 10^\circ\text{C}$ ; дальнейшее увеличение  $T$  приводит к снижению коррозии вследствие радиационного нагрева поверхности материала и ускорения испарения пленок влаги [13, 19]. Эти уникальные результаты, полученные при исследовании соотношения между  $T$ ,  $RH$  и  $TOW$  (продолжительность увлажнения металлов

адсорбционными и фазовыми пленками влаги), имеют большое значение для прогнозирования атмосферной коррозии, несмотря на широкую распространенность и признание концепции *TOW*. В ФДОН кроме *T* и *RH* использовано суммарное за год количество атмосферных осадков (*Prec*, мм), т.к. осадки смывают с поверхности металлов загрязняющие вещества.

### ФДОН для континентальной территории

Для разработки ФДОН использованы базы данных континентальных мест по проекту MICAT [15, 16], а также результаты испытаний в континентальных местах (12 мест) Дальневосточного региона России [17]. Результаты испытаний по программе ISO CORRAG [12] не использованы из-за отсутствия данных *Prec*.

В общем виде ФДОН для континентальных мест можно представить в виде:

$$K_1 = A \cdot [\text{SO}_2]^\alpha \cdot \exp[a \cdot RH + b(T - 10) + c \cdot Prec]. \quad (5)$$

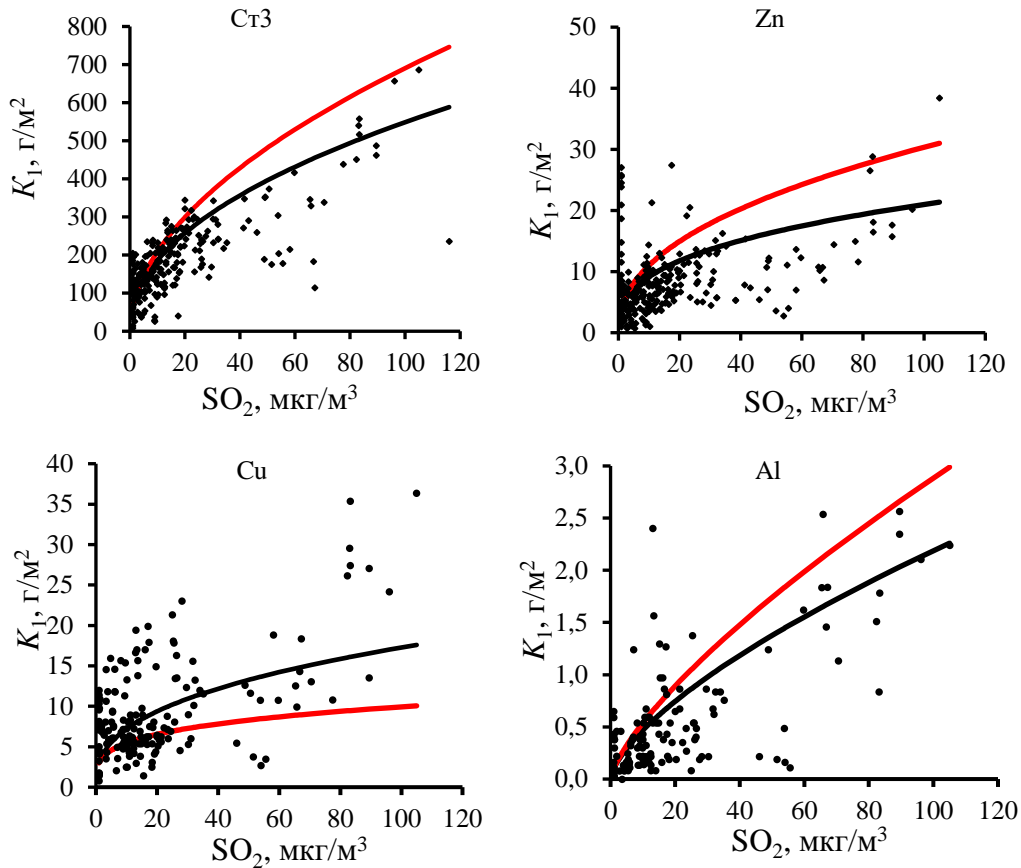
Основным ускорителем коррозии в континентальных местах является загрязненность атмосферы диоксидом серы, которая во всех программах представлена концентрацией ( $[\text{SO}_2]$ ,  $\text{мкг}/\text{м}^3$ ). Однако ни в одной из работ по разработке ФДОС не исследована зависимость  $K_1$  от концентрации  $\text{SO}_2$ . В связи с этим, Ю.М. Панченко и А.И. Маршаков [20] прежде всего исследовали зависимость  $K_1$  от  $[\text{SO}_2]$  для Ст3 и Zn, а Ю.М. Панченко и др. [21] – для Cu и Al (Рисунок 1). На этом же рисунке изображены зависимости  $K_1 \sim [\text{SO}_2]$  в соответствии с ФДОС, то есть с уравнениями (1)–(4).

Разброс точек на Рисунке 1 обусловлен, прежде всего, влиянием на коррозию метеорологических факторов атмосферы, существенно отличающихся для мест испытаний при равных/приблизительно равных  $[\text{SO}_2]$ . Тем не менее, зависимость  $K_1 \sim [\text{SO}_2]^\alpha$  для ФДОН является более достоверной, чем для ФДОС.

Величины коэффициентов  $a$ ,  $b$  (для  $T \leq 10^\circ\text{C}$  и  $T > 10^\circ\text{C}$ ) и  $c$  в уравнении (5) были определены путем анализа влияния на коррозию каждого из параметров агрессивности атмосферы и подбора сочетания различных величин коэффициентов [20, 21]. Полученные величины коэффициентов представлены в Таблице 1. Отметим, что коэффициент при *Prec* оказался отрицательным только для алюминия, что можно объяснить влиянием на его коррозию мощного эффекта дождей.

С использованием параметров агрессивности атмосферы мест испытаний для всех металлов дан расчет величин  $K_1^{\text{ФДОН}}$  по ФДОН (уравнение (5)) и по ФДОС – первая составляющая уравнений (1)–(4). Дано сопоставление рассчитанных и экспериментальных величин; например, потерь углеродистой стали в местах проекта MICAT (Рисунок 2) и программы РФ (Рисунок 3). На рисунках показан интервал относительных ошибок  $K_1^{\text{ФДОН}}$  равный  $\pm 30\%$ , но по стандарту [10] допустимыми считаются ошибки расчета от  $-33\%$  до  $+50\%$  (для стали, Zn, Cu) и от  $-50\%$  до  $+100\%$

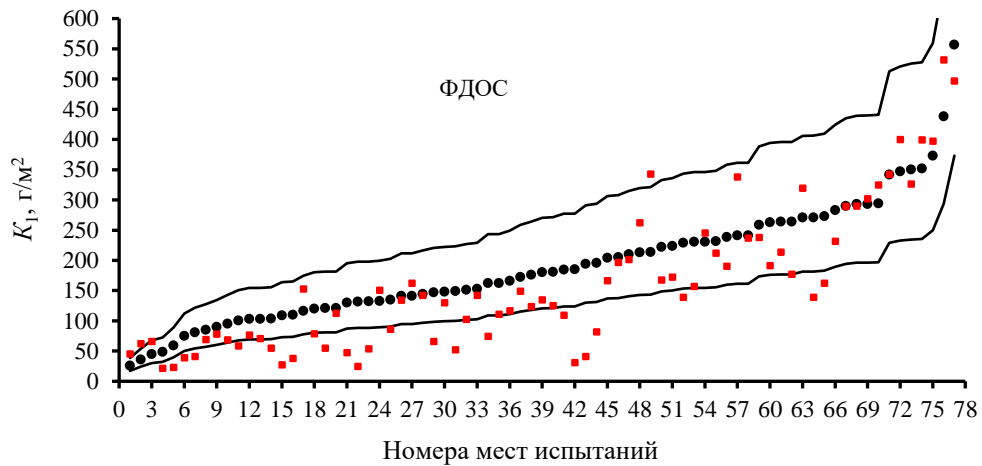
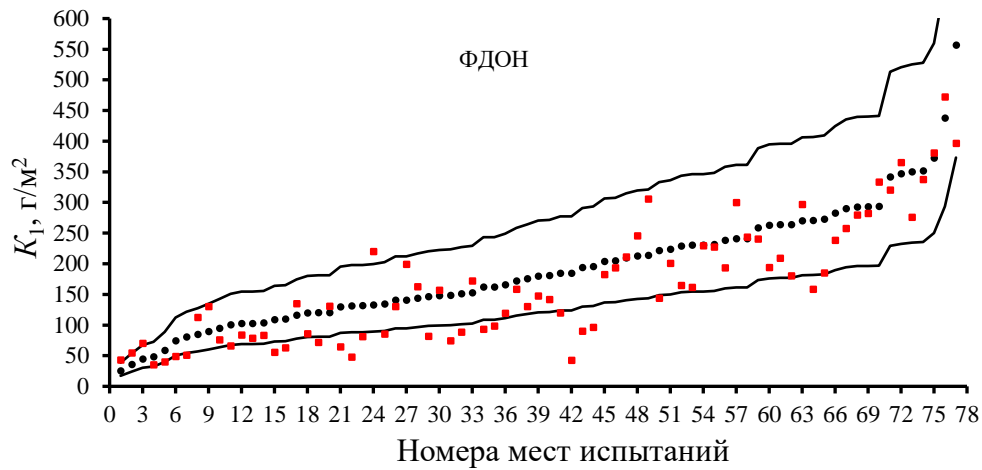
(для Al). При таких допустимых ошибках достоверность  $K_1^{\text{ФДОН}}$  по ФДОН лучше, чем по ФДОС.



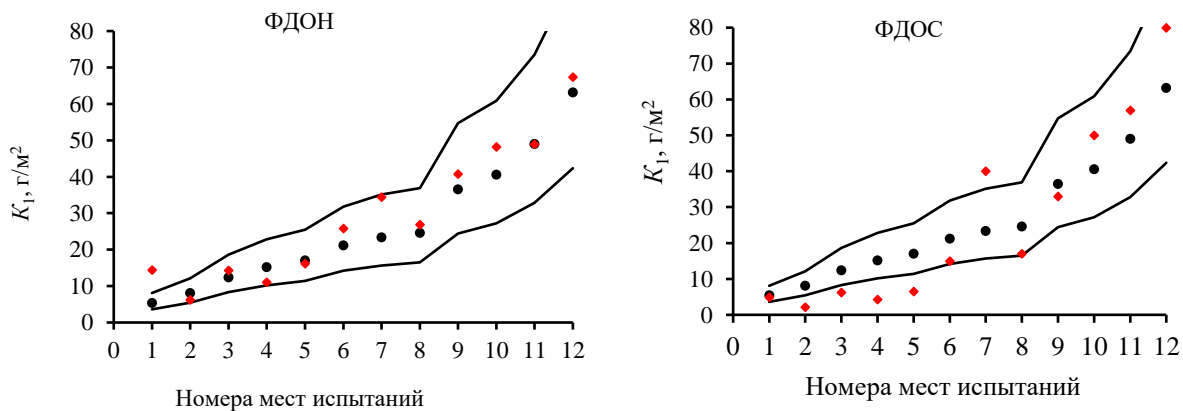
**Рисунок 1.** Зависимости коррозионных потерь за первый год ( $K_1$ ) Ст3, Zn, Cu, Al от концентрации  $\text{SO}_2$ , соответствующие ФДОН (—) и ФДОС (—).

**Таблица 1.** Значения величин коэффициентов, входящих в уравнение (5) [20, 21].

Коэффициент	Ст3	Zn	Cu	Al
$A$	7,7	0,71	0,50	0,01
$a$	0,47	0,28	0,38	0,67
$a$	0,024	0,022	0,025	0,039
$b$ для $T \leq 10^\circ\text{C}$	0,095	0,045	0,085	0,032
$b$ для $T > 10^\circ\text{C}$	-0,095	-0,085	-0,040	-0,065
$c$	0,00056	0,0001	0,0003	-0,0001



**Рисунок 2.** Углеродистая сталь. Программа МІСАТ. Сопоставление  $K_1^{\text{пр}}$  (■) по ФДОН и ФДОС с  $K_1^{\text{экс}}$  (●) в местах испытаний. Тонкие линии – погрешность расчета  $\pm 30\%$ .



**Рисунок 3.** Углеродистая сталь. Программа РФ. Сопоставление  $K_1^{\text{пр}}$  (■) по ФДОН и ФДОС с  $K_1^{\text{экс}}$  (●) в местах испытаний. Тонкие линии – погрешность расчета  $\pm 30\%$ .

Предсказанные по ФДОН потери всех металлов более достоверные, что свидетельствует о некотором преимуществе ФДОН в сравнении с ФДОС не только для мест по программе РФ, но и для мест по международным программам.

Для подтверждения приоритетности ФДОН для стали и цинка Ю.М. Панченко и др. применили методы статистического анализа для оценки достоверности предсказаний коррозионных потерь по программам UN/ECE и РФ [22, 23]. Используются следующие основные критерии (обозначая  $K_1^{\text{экс}}$  как переменная  $x$ ,  $K_1^{\text{пр}}$  – как переменная  $y$ ):

1. Стандартный коэффициент детерминации  $R_{\text{ст}}$ :

$$R_{\text{ст}} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[ \sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\left[ \left( \sum x_i^2 - n(\bar{x})^2 \right) \left( \sum y_i^2 - n(\bar{y})^2 \right) \right]^{1/2}}, \quad (6)$$

где  $\bar{x}$  – среднее арифметическое значений  $x_i$ ,  $\bar{y}$  – среднее арифметическое значений  $y_i$ ,  $n$  – количество наблюдений.

2. Обобщенный коэффициент детерминации  $R_{\text{нов}}^2$ :

$$R_{\text{нов}}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left( y_i - \frac{(yx)_{\text{cp}}}{(x^2)_{\text{cp}}} x_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}, \quad (7)$$

где  $(yx)_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i x_i$ ,  $(x^2)_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2$ .

3. Средняя относительная ошибка MAPE (Mean Absolute Percentage Error):

$$\text{MAPE}(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{|x_i|} \cdot 100. \quad (8)$$

4. Симметричная средняя абсолютная процентная погрешность SMAPE (Symmetric Mean Absolute Percentage Error):

$$\text{SMAPE}(\%) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{|x_i| + |y_i|} \cdot 100. \quad (9)$$

Показано [22, 23], что применять стандартный коэффициент детерминации  $R_{\text{ст}}^2$  (уравнение (6)) не рекомендуется, так как этот критерий свидетельствует о степени приближения распределения точек к некоторой прямой. Но при точном прогнозе  $K_1^{\text{пр}} = K_1^{\text{экс}}$ , то есть, точки должны располагаться на этой линии с угловым

коэффициентом, равным 1. Критерием оценки приближения точек к этой линии является обобщенный коэффициент детерминации  $R_{\text{нов}}^2$  (уравнение (7)).

Показано также, что оценка достоверности ФДО только на основании средней относительной ошибки МАРЕ (уравнение (8)) может привести к некорректным выводам, что связано со значительным влиянием единичных, но больших отклонений  $K_1^{\text{пр}}$  от  $K_1^{\text{экс}}$ , а также с погрешностью при определении  $K_1^{\text{экс}}$ . В связи с этим, разброс данных относительно прямой  $K_1^{\text{пр}} = K_1^{\text{экс}}$  рекомендуется оценивать по величине SMAPE (уравнение (9)). Вместе с тем, при анализе завышенных и заниженных значений  $K_1^{\text{пр}}$  в каждой категории коррозионной агрессивности атмосферы целесообразно использовать средние величины относительных ошибок для  $y_i > x_i$  (+ $\delta$ ) и для  $y_i < x_i$  (- $\delta$ ):

$$+\delta = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \delta_i \text{ и } -\delta = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} \delta_i,$$

где  $\delta_i$  (%) =  $[(y_i - x_i) / x_i] \cdot 100$ ,  $m$  – число точек с  $\delta_i > 0$ .

Таким образом, в работах [22, 23] впервые дан анализ статистическим показателям, характеризующих свойства разработанных ФДО.

Включение в работе [22] данных мест испытаний по программе ЕЭК ООН, отличающихся по агрессивности от мест по проекту МІСАТ, привело к необходимости корректировки отдельных величин коэффициентов для стали и цинка (в Таблице 2 они отмечены курсивом). Оказалось, что это привело к большей достоверности расчета  $K_1^{\text{пр}}$  в целом для всех мест.

**Таблица 2.** Значения величин коэффициентов, входящих в уравнение (5) [23].

Коэффициент	Ст3	Zn	Cu	Al
<i>A</i>	7,7	0,45	0,50	0,01
<i>α</i>	0,47	0,36	0,38	0,67
<i>a</i>	0,024	0,023	0,025	0,039
<i>b</i> для $T \leq 10^\circ\text{C}$	0,095	0,025	0,085	0,032
<i>b</i> для $T > 10^\circ\text{C}$	-0,065	-0,055	-0,055*	-0,065
<i>c</i>	0,00056	0,00035	0,0003	-0,0001

На основании анализа рассчитанных статистических показателей показано, что для континентальных территорий мира наиболее достоверными являются коррозионные потери всех металлов за первый год, полученные по ФДОН, разработанных на установленной связи  $K = f([\text{SO}_2])$ .

В работе [23] даны результаты сопоставления  $K_1^{\text{пр}}$ , рассчитанных по ФДОН и ФДОС, с  $K_1^{\text{экс}}$  в интервалах коррозионной агрессивности атмосферы С1÷С5 в соответствии со стандартом [10] и с дополнительными градациями для категории С2,

предложенными в работе [24]. Полученные результаты свидетельствуют, что  $K_1^{пр}$  по ФДОС в большем числе мест имеют заниженные значения, выходящие за допустимый интервал относительной ошибки:  $-33\%$  (для стали, Zn, Cu) и  $-50\%$  (для Al). Оценка достоверности  $K_1^{пр}$  по ФДОН и ФДОС для мест испытаний в среднем для всех категорий коррозионной агрессивности атмосферы представлена относительными ошибки  $MARE = \delta_{ср}, -\delta$  и  $+\delta$  (Таблица 3).

**Таблица 3.** Относительные ошибки ( $\delta_{ср}, -\delta, +\delta, \%$ ) предсказаний  $K_1$ , рассчитанных по ФДОН и ФДОС.

Металл	ФДОН			ФДОС		
	$\delta_{ср}$	$-\delta$	$+\delta$	$\delta_{ср}$	$-\delta$	$+\delta$
Ст3	23,7	-20,6	31,2	33,6	-35,9	25,2
Zn	27,7	-25,6	28,9	31,7	-33,0	29,9
Cu	46,8	-35,7	58,0	58,9	-61,4	40,0
Al	56,4	-31,9	85,7	51,1	-52,3	43,4

Таким образом, в работе [23] впервые представлены численные значения  $K_1^{пр}$ , рассчитанные по ФДОС и ФДОН, дано их сопоставление с  $K_1^{экс}$  для каждого места испытаний. Впервые для полученных больших массивов данных  $K_1^{пр}$  для каждого металла рассчитаны статистические показатели MARE. На основании полученных  $-\delta$  и  $+\delta$  установлено, что достоверные  $K_1^{пр}$  с большей вероятностью можно получить:

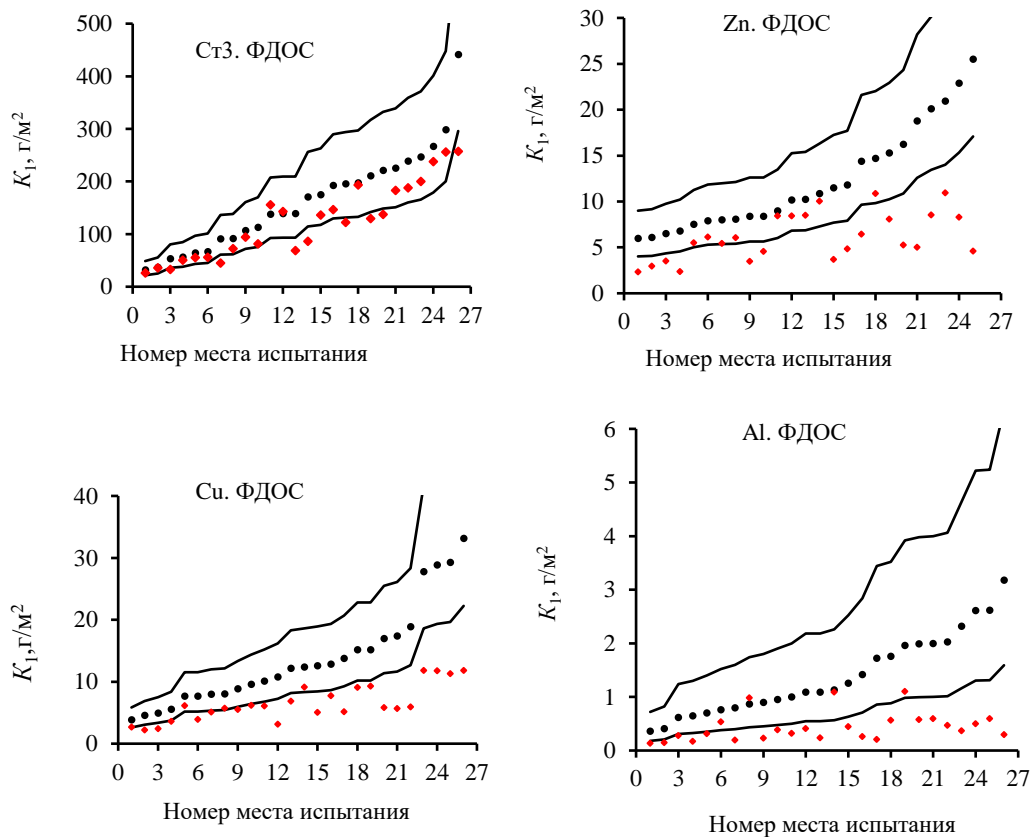
- для углеродистой стали по ФДОН для всех категорий коррозионной агрессивности атмосферы, по ФДОС – для категорий С2-3, С3 и С4;
- для цинка по ФДОН и ФДОС для всех категорий агрессивности атмосферы, где проводились испытания: С2-2, С2-3, С3 и С4;
- для меди только по ФДОН;
- для алюминия по ФДОН для мест испытаний с коррозионной агрессивностью С2-1, С2-2, С2-3 и С3, а по ФДОС – только для категорий С2-1 и С2-2.

#### *ФДОН для мест с атмосферой, содержащей $SO_2$ и $Cl^-$*

В атмосфере континентальных мест испытаний, как правило, не присутствуют морские соли, в связи с чем была возможность в первом приближении оценить влияние  $SO_2$  на коррозию металлов. В приморских местах атмосфера в разной степени загрязнена  $SO_2$ , в присутствии которого не представилось возможным установить связь  $K=f([Cl^-])$ , что усложнило разработку ФДО для приморских мест.

ФДОС представляют сумму коррозионных эффектов за счет агрессивных  $SO_2$  и  $Cl^-$ , при этом для каждого агрессивного агента влияние климатических факторов различное. В работе [25] показано, что использование ФДОС для многих приморских

мест мира приводит к недостоверным  $K_1^{\text{пр}}$  для всех металлов. На Рисунке 4 представлено сопоставление  $K_1^{\text{пр}}$  с  $K_1^{\text{экс}}$  для 26 приморских мест России, а именно, на побережьях морей Северного и Тихого океанов, Баренцева моря (Северная коррозионная станция) и Черного моря (г. Геленджик), для которых параметры агрессивности атмосферы представлены в работах [17, 26]. Рассчитанные по ФДОС  $K_1^{\text{пр}}$  для всех металлов, особенно для Cu и Al, существенно ниже  $K_1^{\text{экс}}$  (Рисунок 4).



**Рисунок 4.** Сопоставление  $K_1^{\text{пр}}$  (♦), рассчитанных по ФДОС, с  $K_1^{\text{экс}}$  (●) для 26 приморских мест РФ. Тонкие линии – линии относительных ошибок  $-33\%$  и  $+50\%$  для Ст3, Zn, Cu и  $-50\%$  и  $+100\%$  для Al.

В связи с этим, была разработана ФДОН для приморских мест на территории РФ [25]. Были предложены 4 вида моделей, в которых учитывалось одинаковое влияние климатических факторов на коррозию в присутствии  $\text{SO}_2$  и  $\text{Cl}^-$ , что приводило к упрощению моделей. В этих ФДО был учтен «моющий» эффект дождей, т. к. периодическое очищение поверхности от морских солей существенно сказывается на коррозии металлов. По результатам сопоставления  $K_1^{\text{пр}}$  с  $K_1^{\text{экс}}$  и оценок статистических критериев была выбрана модель:

$$K_1 = A \cdot \left\{ [\text{SO}_2]^\alpha + [k\text{Cl}]^\beta \right\} \cdot \exp[a \cdot RH + b(T - 10) + c \cdot \text{Prec}], \quad (10)$$

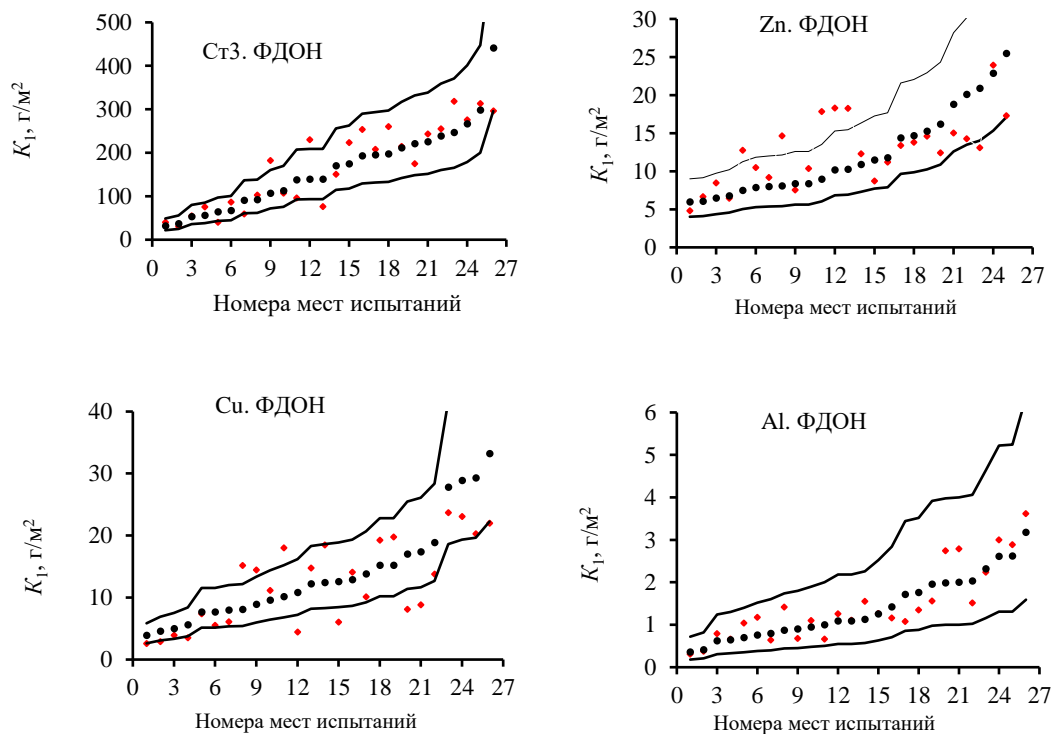
где  $k$  – коэффициент, учитывающий моющий эффект дождей,  $[Cl]$  – скорость осаждения хлоридов, определенная методом «влажная свеча».

Величины коэффициентов  $A$ ,  $\alpha$ ,  $a$ ,  $b$  (для двух температурных интервалов) и  $c$  для каждого металла представлены в Таблице 2. Величины коэффициентов  $k$  и  $\beta$  были определены анализом статистических показателей для множественных их сочетаний. В Таблице 4 даны численные значения  $\beta$  и  $k^\beta$  с учетом, что  $[kCl]^\beta = k^\beta \cdot [Cl]^\beta$ .

**Таблица 4.** Значения коэффициентов, входящих в уравнение (10).

Коэффициент	Сталь	Цинк	Медь	Алюминий
$k^\beta$	0,68	0,64	0,61	0,46
$\beta$	0,58	0,51	0,62	0,85

На Рисунке 5 даны сопоставления  $K_1^{пр}$ , рассчитанных по уравнению (10) с учетом величин коэффициентов, представленных в Таблицах 2 и 4, с  $K_1^{экс}$  для приморских мест РФ.



**Рисунок 5.** Сопоставление  $K_1^{пр}$  (♦), рассчитанных по ФДОН, с  $K_1^{экс}$  (●) для 26 приморских мест РФ. Тонкие линии – линии относительных ошибок  $-33\%$  и  $+50\%$  для Ст3, Zn, Cu и  $-50\%$  и  $+100\%$  для Al.

Рассчитанные  $K_1^{пр}$  по ФДОН в сравнении с  $K_1^{пр}$  по ФДОС (Рисунок 5) лишь в незначительном числе мест выходят за пределы допустимых ошибок. Согласно статистическим критериям (Таблица 5), можно сделать выводы:

1. Для ФДОН значения  $R_{нов}^2$ , показывающего отклонение точек ( $K_1^{экс}:K_1^{пр}$ ) относительно прямой  $K_1^{пр} = K_1^{экс}$  близко к 0. Это значит, что ФДОН дает небольшой симметричный разброс точек вокруг линии  $K_1^{пр} = K_1^{экс}$  как при малых, так и при больших величинах  $K_1^{пр}$ .

2. Значения MAPE и SMAPE в случае стали меньше, а в случае Zn, Cu и Al – существенно меньше для предсказаний ФДОН, чем для предсказаний по ФДОС.

Таким образом, статистические показатели свидетельствуют, что для территории РФ ФДОН дают более точный прогноз в сравнении с ФДОС.

**Таблица 5.** Значения статистических показателей достоверности  $K_1^{пр}$ , рассчитанных по ФДОС и ФДОН.

Металл	$R_{нов}^2$		MAPE, %		SMAPE, %	
	ФДОС	ФДОН	ФДОС	ФДОН	ФДОС	ФДОН
Ст3	0,75	0,002	23,8	24,3	28,6	24,1
Zn	0,88	0,03	45,2	30,3	63,2	26,3
Cu	0,96	0,25	47,6	35,9	64,9	38,0
Al	0,94	0,04	64,2	23,5	100,6	22,4

ФДОН (уравнение (10)) с величинами коэффициентов  $A$ ,  $\alpha$ ,  $a$ ,  $b$ , полученных для мест с не морской атмосферой, и дополненными коэффициентами  $k^\beta$  и  $\beta$ , рассчитанными для мест с морской атмосферой, являются ФДОН для всех типов атмосфер (уравнения (11)–(14)):

Для стали

$$K_1 = 7,7 \left\{ [\text{SO}_2]^{0,47} + 0,68 [\text{Cl}]^{0,58} \right\} \cdot \exp(0,024RH + 0,095(T - 10) + 0,00035Prec), T \leq 10^\circ\text{C} \quad (11)$$

$$K_1 = 7,7 \left\{ [\text{SO}_2]^{0,47} + 0,68 [\text{Cl}]^{0,58} \right\} \cdot \exp(0,024RH - 0,065(T - 10) + 0,00035Prec), T > 10^\circ\text{C}$$

Для цинка

$$K_1 = 0,45 \left\{ [\text{SO}_2]^{0,36} + 0,64 [\text{Cl}]^{0,51} \right\} \cdot \exp(0,023RH + 0,025(T - 10) + 0,00035Prec), T \leq 10^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$K_1 = 0,45 \left\{ [\text{SO}_2]^{0,36} + 0,64 [\text{Cl}]^{0,51} \right\} \cdot \exp(0,023RH - 0,055(T - 10) + 0,00035Prec), T > 10^\circ\text{C}$$

Для меди

$$K_1 = 0,5 \left\{ [\text{SO}_2]^{0,38} + 0,61[\text{Cl}]^{0,62} \right\} \cdot \exp(0,025RH + 0,095(T - 10) + 0,0003Prec), \quad T \leq 10^\circ\text{C}$$

$$K_1 = 0,5 \left\{ [\text{SO}_2]^{0,38} + 0,61[\text{Cl}]^{0,62} \right\} \cdot \exp(0,025RH - 0,065(T - 10) + 0,0003Prec), \quad T > 10^\circ\text{C}$$
(13)

Для алюминия

$$K_1 = 0,01 \left\{ [\text{SO}_2]^{0,67} + 0,46[\text{Cl}]^{0,85} \right\} \cdot \exp(0,039RH + 0,032(T - 10) + 0,0001Prec), \quad T \leq 10^\circ\text{C}$$

$$K_1 = 0,01 \left\{ [\text{SO}_2]^{0,67} + 0,46[\text{Cl}]^{0,85} \right\} \cdot \exp(0,039RH - 0,065(T - 10) + 0,0001Prec), \quad T > 10^\circ\text{C}$$
(14)

Разработанные ФДОН внесены в ГОСТ 9.107-2023 [27].

В работе [25] сделана проверка возможности применения ФДОС и ФДОН для предсказания  $K_1^{\text{пр}}$  для разных мест мира по проекту МІСАТ. Полученные результаты свидетельствуют, что ФДОС, как и ФДОН, не могут быть рекомендованы для предсказания  $K_1$  в пределах допустимых ошибок в любых приморских регионах мира, особенно для мест с высокой агрессивностью атмосферы. Видимо, главной причиной невозможности разработки надежных ФДО по представленным данным  $K_1^{\text{экс}}$  является неодинаковая ориентация образцов во всех местах испытаний к преимущественным направлениям морского ветра, являющегося источником выноса в атмосферу хлоридов – главного коррозионного реагента. Для разработки надежных ФДО для любых приморских регионов мира необходимы значения  $K_1^{\text{экс}}$ , полученные при установке образцов к преобладающим направлениям морского ветра.

*ФДО для оценки категорий коррозионной агрессивности атмосферы мест испытаний*

Результаты сопоставления  $K_1^{\text{пр}}$  по ФДОН и ФДОС с экспериментальными значениями, представленные для континентальных и приморских мест с различной загрязненностью воздуха диоксидом серы, свидетельствуют о существенном несоответствии с  $K_1^{\text{экс}}$  в отдельных местах. Это возможно связано не только с несовершенством моделей, но и множеством объективных причин, обобщенных в работе [25]. К ним можно отнести: не полный учет факторов агрессивности атмосферы и их синергетического эффекта, влияния мощного действия дождей, ориентация образцов по отношению к источнику загрязнению воздуха диоксидом серы и/или к выносу морских солей, разные методики оценки содержания  $\text{SO}_2$  в воздухе (концентрация ( $\text{мкг}/\text{м}^3$ ) или скорость осаждения ( $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ )), и скорости осаждения хлоридов («влажная свеча» или «сухое полотно») и т. д. Кроме того, не исключена неточность определения величин  $K_1^{\text{экс}}$  из-за не соблюдения методик подготовки образцов и их травления после экспозиции. Все эти причины невозможно исключить при разработке моделей, позволяющих прогнозировать  $K_1$  в допустимых интервалах относительных ошибок.

Для практических целей большой интерес представляет корректная оценка категории коррозионной агрессивности атмосферы. Категории коррозионной агрессивности атмосферы являются технической характеристикой, которая обеспечивает правильный выбор металлических материалов и защитных мер в зависимости от конкретного применения изделия. Категории определяются по величинам наблюдаемых коррозионных потерь за первый год, то есть по величине  $K_1^{\text{ЭКС}}$  [10]. Каждой категории соответствует интервал величин  $K_1^{\text{ЭКС}}$  (Таблица 6) [10]. Представленные интервалы величин  $K_1^{\text{ЭКС}}$  достаточно большие.

**Таблица 6.** Интервалы коррозионных потерь массы/коррозионных поражений для категорий коррозионной агрессивности атмосферы.

Категория	Коррозионные потери за первый год, $K_1$				
	Единицы измерения	Углеродистая сталь	Цинк	Медь	Алюминий
C1	г/(м <sup>2</sup> ·год)	$r_{\text{corr}} \leq 10$	$r_{\text{corr}} \leq 0,7$	$r_{\text{corr}} \leq 0,9$	Незначит.
	мкм/год	$r_{\text{corr}} \leq 1,3$	$r_{\text{corr}} \leq 0,1$	$r_{\text{corr}} \leq 0,1$	–
C2	г/(м <sup>2</sup> ·год)	$10 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$0,7 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$0,9 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$r_{\text{corr}} \leq 0,6$
	мкм/год	$1,3 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,7$	$0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,6$	–
C3	г/(м <sup>2</sup> ·год)	$200 < r_{\text{corr}} \leq 400$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 15$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 12$	$0,6 < r_{\text{corr}} \leq 2$
	мкм/год	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$0,7 < r_{\text{corr}} \leq 2,1$	$0,6 < r_{\text{corr}} \leq 1,3$	–
C4	г/(м <sup>2</sup> ·год)	$400 < r_{\text{corr}} \leq 650$	$15 < r_{\text{corr}} \leq 30$	$12 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$2 < r_{\text{corr}} \leq 5$
	мкм/год	$50 < r_{\text{corr}} \leq 80$	$2,1 < r_{\text{corr}} \leq 4,2$	$1,3 < r_{\text{corr}} \leq 2,8$	–
C5	г/(м <sup>2</sup> ·год)	$650 < r_{\text{corr}} \leq 1500$	$30 < r_{\text{corr}} \leq 60$	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 10$
	мкм/год	$80 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$4,2 < r_{\text{corr}} \leq 8,4$	$2,8 < r_{\text{corr}} \leq 5,6$	–
CX	г/(м <sup>2</sup> ·год)	$1500 < r_{\text{corr}} \leq 5500$	$60 < r_{\text{corr}} \leq 180$	$50 < r_{\text{corr}} \leq 90$	$r_{\text{corr}} > 10$
	мкм/год	$200 < r_{\text{corr}} \leq 700$	$8,4 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$5,6 < r_{\text{corr}} \leq 10$	–

Ю.М. Панченко и др. в работе [28] рассмотрели возможность использования ФДОН и ФДОС для прогноза величин  $K_1^{\text{МР}}$ , соответствующих интервалам  $K_1^{\text{ЭКС}}$  в каждой категории. Были использованы результаты программ UNECE, RF и проекта МІСАТ. В каждом месте было проведено от 1 до 4-х однолетних испытаний типовых металлов, общее количество которых дано в Таблице 7, а интервалы параметров агрессивности атмосферы и величин  $K_1^{\text{ЭКС}}$  для этих мест в Таблицах 8 и 9 соответственно.

Сопоставление рассчитанных и экспериментально определенных категорий агрессивности для мест с не морской и морской атмосферой представлено на Рисунках 6 и 7 соответственно. Оценить достоверность совпадений категорий по  $K_1^{\text{МР}}$

и по  $K_1^{\text{экс}}$  можно по расположению точек ( $K_1^{\text{экс}}$ ;  $K_1^{\text{пр}}$ ) на координатном поле этих рисунков. При совпадении категорий, оцененных по  $K_1^{\text{пр}}$ , с определенными по  $K_1^{\text{экс}}$ , точки ( $K_1^{\text{экс}}$ ;  $K_1^{\text{пр}}$ ) располагаются в квадратах, ограниченных интервалами величин  $K$  соответствующей категории. При переходе от одной категории к другой точки ( $K_1^{\text{экс}}$ ;  $K_1^{\text{пр}}$ ) лежат на линии  $K_1^{\text{пр}} = K_1^{\text{экс}}$ , или их отклонение от линии допустимо в пределах относительных ошибок от  $-33\%$  до  $+50\%$  для стали, Zn, Cu и от  $-50\%$  до  $+100\%$  для Al.

**Таблица 7.** Количество однолетних испытаний по программам.

Атмосфера	MICAT			UNECE		RF		Общее количество	
			Ст3						
Не морская	60		81	17		158			
Морская	121		нет	26		147			
Zn									
Не морская	57		95	15		167			
Морская	97		нет	24		121			
Cu									
Не морская	60		27	17		104			
Морская	106		нет	26		132			
Al									
Не морская	53		нет	16		69			
Морская	96		нет	26		122			

**Таблица 8.** Интервалы климатических и аэрохимических параметров условий испытаний в не морской и морской атмосферах.

Атмосфера	$T, ^\circ\text{C}$		$RH, \%$		$Prec, \text{мм}$		$[\text{SO}_2], \text{мкг/м}^3$		$[\text{Cl}], \text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$	
	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс
Не морская	-16,6	27	33	90	17	3237	1	83,3	0	2,5
Морская	-13,0	30,4	54	91	13	4392	1	72,2	2,7	376

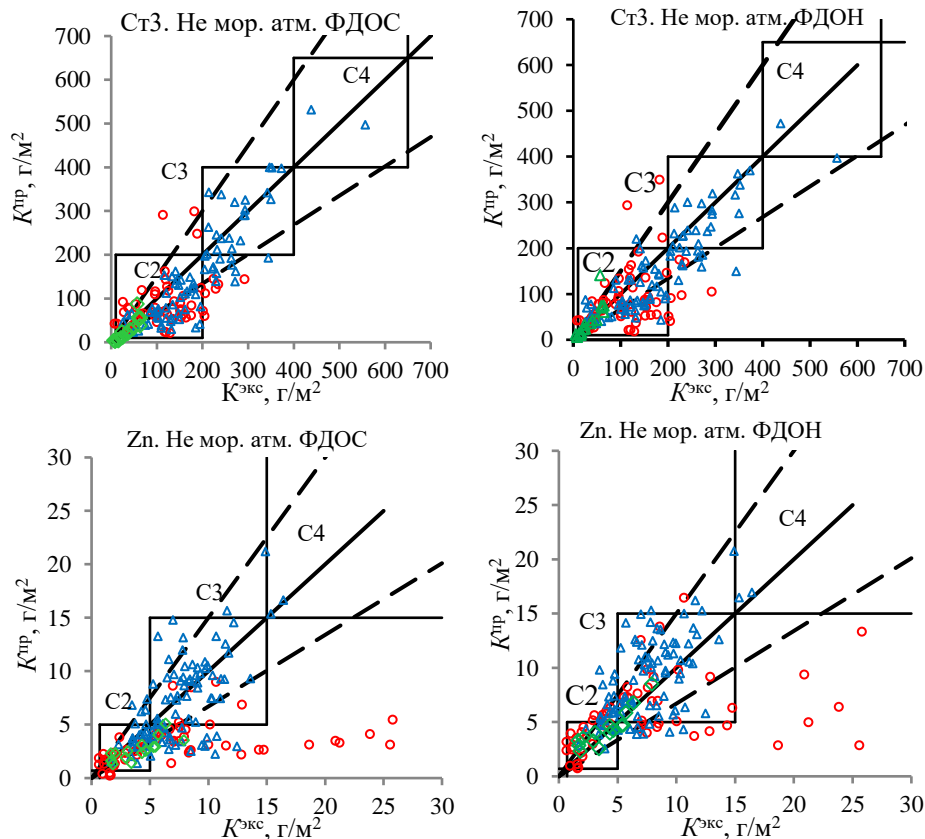
Показана возможность применения ФДОС и ФДОН для оценки коррозионной агрессивности не морской атмосферы категорий С1–С3 по отношению к стали, Zn, Cu и категорий С1–С2 по отношению к Al. В местах с морской атмосферы возможно прогнозирование категорий С1–С4 по отношению к Ст3, Zn, Cu и категорий С1–С3

по отношению к Al в различных климатических регионах мира. Для территории России приоритетными являются ФДОН.

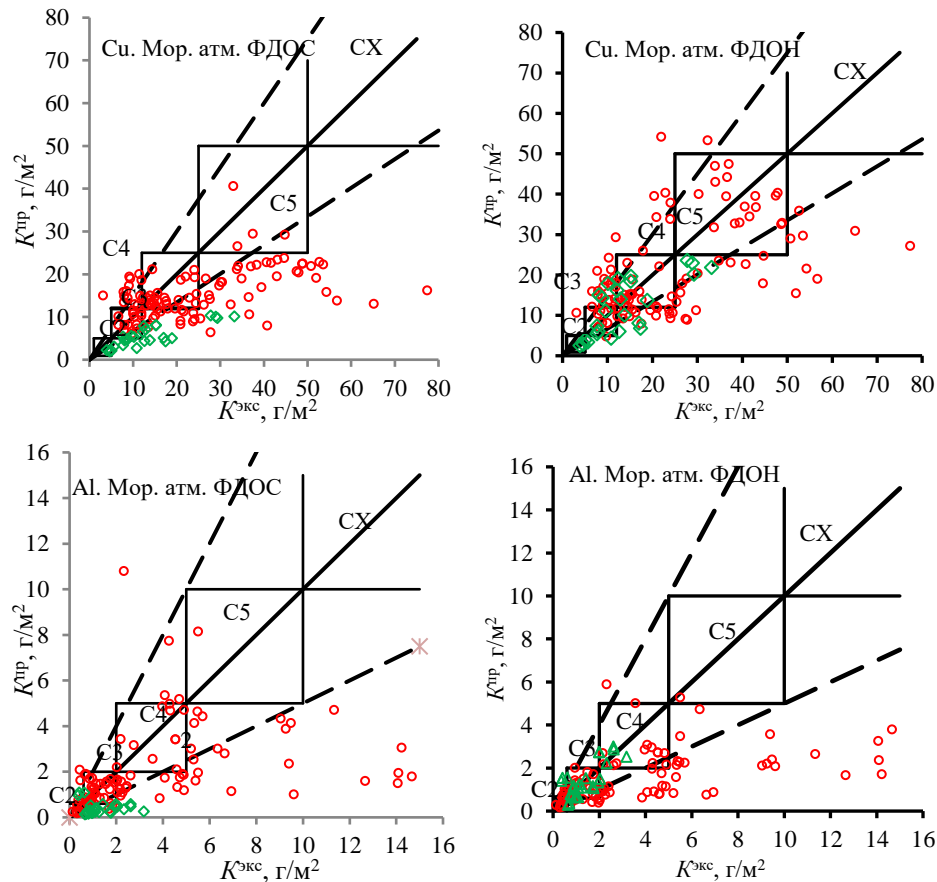
**Таблица 9.** Интервалы годовых коррозионных потерь металлов в не морских и морских атмосферах.

Атмосфера	$K^{экс}, \text{г/м}^2$							
	Сталь		Цинк		Медь		Алюминий	
	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс
Не морская	5,4	557	0,65	25,78	0,76	27,87	0,027	2,73
Морская	32,5	3207	1,01	78,55	3,14	77,41	0,14	14,66

В этой же работе авторы приводят доказательства возможного завышения  $K_1^{экс}$  для категорий высокой агрессивности.



**Рисунок 6.** ФДОС и ФДОН. Не морская атмосфера. Сопоставление  $K^{пр}$  с  $K^{экс}$  и категорий, оцененных по  $K^{пр}$ , с категориями, определенными по  $K^{экс}$ . Интервал относительных ошибок (---). Линия (—)  $K^{пр} = K^{экс}$ . Данные по программам MICAT (○), ECE/UN (△), РФ (◇).



**Рисунок 7.** ФДОС и ФДОН. Морская атмосфера. Сопоставление  $K^{np}$  с  $K^{экс}$  и категорий, оцененных по  $K^{np}$ , с категориями, определенными по  $K^{экс}$ . Интервал относительных ошибок (---). Линия (—)  $K^{np} = K^{экс}$ . Данные по программам MICAT (○), ESEC/UN (△), РФ (◇).

В работах [22, 23, 28] объяснены причины преимущества ФДОН по сравнению с ФДОС:

1. При разработке ФДОС статистическим критерием достоверности  $K_1^{np}$  использован стандартный коэффициент детерминации  $R_{ст}^2$ , согласно которому оценивалось распределение точек ( $K_1^{экс}$ ;  $K_1^{np}$ ) вдоль любой прямой, вместо обобщенного коэффициента детерминации  $R_{нов}^2$ , оценивающего распределение точек вдоль прямой  $K_1^{np} = K_1^{экс}$ .

2. Не использованы критерии средней относительной ошибки MAPE и симметричной средней абсолютной процентной погрешности SMAPE.

3. Для ФДОС дано соотношение пересчета концентрации  $SO_2$ ,  $мкг/м^3$  ( $P_{d,c}$ ), в скорость осаждения  $SO_2$ ,  $мг/(м^2 \cdot сут)$  ( $P_{d,p}$ ), с учетом коэффициента 0,8 согласно стандарту [10]. В российском стандарте [29] на основе ранних исследований дано обратное соотношение:  $[SO_2] = 1$   $мкг/м^3$  соответствует  $[SO_2] = 0,8$   $мг/(м^2 \cdot сут)$ . Это соотношение подтверждено исследованиями, проведенными в 80–90-х гг. прошлого столетия на коррозионных станциях ИФХЭ РАН, и внесено в новый российский

стандарт [27]. Применение заниженного коэффициента привело к заниженным  $K_1^{\text{пр}}$  по ФДОС.

4. В ФДОС нет ограничения использования величин  $P_{d,p} < 1$  мг/(м<sup>2</sup>·сут). Применение таких величин недопустимо, так как учет влияния климатических факторов возможен только при  $P_{d,p} \geq 1$  мг/(м<sup>2</sup>·сут). При использовании  $P_{d,p} < 1$  мг/(м<sup>2</sup>·сут) уменьшается вклад в величину  $K_1$  климатических факторов, а при  $P_{d,p} = 0$  в местах с не морской атмосферой  $K_1^{\text{пр}} = 0$ .

*Модель прогноза коррозионных потерь за первый год на основе алгоритма «случайный лес»*

М.А. Гаврюшина и др. [30, 31] разработали модели прогноза  $K_1$  стали и алюминия на основе алгоритма «случайный лес», являющегося одним из популярных методов машинного обучения [32]. Была использована база данных (БД) международных программ ISO CORRAG, MICAT, ECE/UN и программ РФ. В набор данных вошли  $K_1^{\text{экс}}$  и параметры  $T$ ,  $RH$ ,  $[SO_2]$ ,  $[Cl^-]$  и  $Prec$ . Реализация алгоритма «случайный лес» и расчет важности признаков, показывающих их влияние на величину прогноза коррозионных потерь, проводилась при помощи библиотеки scikit-learn [33]. Обучение деревьев проводилось на основе обучающей выборки, которая составляет 70% от всей базы данных.

Для прогноза  $K_1$  каждого металла были разработаны две модели: в открытой атмосфере в различных регионах мира (модель F1) и только в континентальных районах мира (модель F2). В первой модели наиболее важным признаком для получения достоверного значения  $K_1$  стали является скорость осаждения хлоридов, а для  $K_1$  алюминия – величина относительной влажности воздуха. В случае второй модели (для континентальных районов) наибольшее значение для правильного предсказания  $K_1$  обоих металлов имеет содержание  $SO_2$  в воздухе. Надо подчеркнуть, что важность признаков в моделях «случайный лес» не всегда совпадает с ранжированием параметров атмосферы по степени их влияния на процесс коррозии металла. Значения важности признаков определяют параметры, которые наиболее значимы для получения достоверного прогноза с помощью модели, обученной на конкретной базе данных.

С использованием статистических критериев  $R_{\text{нов}}^2$ , MAPE, SMAPE (уравнения (6)–(9)) проведено сравнение точности предсказаний  $K_1$  стали и алюминия по моделям F1 и ФДОС в различных регионах мира и по моделям F2 и ФДОС только в континентальных районах (Таблица 10). В этой таблице приведены также значения специального критерия «процент удовлетворительных значений» (PSV) величины  $K_1^{\text{пр}}$ :

$$PSV = (M / N) \cdot 100\%,$$

где  $M$  – число удовлетворительных значений  $K_1^{\text{пр}}$ . Такими значениями  $K_1^{\text{пр}}$  считаются те, которые соответствуют интервалу неопределенности расчета первогодových

коррозионных потерь металла по стандарту [10]. Чем ближе PSV к 100%, тем большее число  $K_1^{пр}$  соответствует допустимому интервалу ошибок, и, следовательно, модель является более достоверной.

**Таблица 10.** Значения статистических критериев достоверности предсказаний  $K_1$  стали и алюминия по моделям «случайные лес» (RF1 и RF2) и функциям доза–ответ (ФДОС и ФДОН).

Металл	Число объектов в БД		Модель	$R_{new}^2$	MAPE, %	SMAPE, %	PSV, %
	Общее	Тест					
Сталь	524	158	RF1	0,36	39	29	75
			ФДОС	0,50	44	40	60
	152	46	RF2	0,026	29	25	78
			ФДОН	0,40	37	47	57
Al	425	128	RF1	0,59	76	52	68
			ФДОС	0,52	101	71	50
	52	16	RF2	0,001	49	42	81
			ФДОН	0,03	51	53	56

Как следует из Таблицы 10, достоверность обеих моделей «случайный лес» существенно лучше, чем функций «доза–ответ», согласно всем статистическим показателям. Единственным исключением стало предсказание  $K_1$  стали на территории России с холодным климатом [30]. Очевидно, что универсальные модели RF, разработанные на объединенных базах данных и предназначенные для предсказания  $K_1$  в различных регионах мира, могут быть недостаточно точными при прогнозировании коррозионных потерь металла в конкретном климатическом регионе из-за малого числа объектов с экстремальными значениями признаков в объединенной базе данных.

### Модель прогноза долговременных коррозионных потерь

Для определения сроков службы металлических сооружений и конструкций, разработки методов и средств их защиты и консервации важны сведения о коррозионной стойкости металлов за длительные периоды. Достоверные оценки коррозионной стойкости могут быть обеспечены натурными коррозионными испытаниями, являющимися длительными и весьма дорогостоящими. В связи с этим исследователями большое внимание уделяется разработке моделей, обеспечивающих долгосрочный прогноз без проведения натурных испытаний.

Согласно современным представлениям, коррозия подчиняется степенному-линейному закону: степенной закон на начальной стадии до наступления стационарной стадии, линейный закон на стационарной стадии. В стандарте ISO 9224 [11] для начальной стадии закон представлен в виде:

$$D = r_{\text{corr}} \cdot t^b, \quad (15)$$

где  $D$  – коррозионные потери в  $\text{г/м}^2$  или в  $\text{мкм}$ ;  $t$  – время экспозиции, год;  $b$  – коэффициент, характеризующий среду;  $r_{\text{corr}}$  – коррозионные потери за первый год. Считая, что через 20 лет коррозионный процесс стабилизируется, скорость коррозии может быть вычислена по производной функции уравнения (16) при  $t = 20$ :

$$\frac{dD}{dt} = b \cdot r_{\text{corr}}(t)^{b-1}. \quad (16)$$

Для последующих лет необходимо применять уравнение (17):

$$D(t > 20) = r_{\text{corr}} \left[ 20^b + b(20^{b-1})(t - 20) \right]. \quad (17)$$

В стандарте ISO 9224 [11] для оценки величин  $b$  использовали результаты 4-, 6- и 8-летних испытаний коррозии с промежуточным съемом образцов через 1, 2, 4 и 6 лет в 53 местах с различным типом атмосферы, расположенных в 14 странах мира. Испытания проводились в рамках международной программы ISO CORRAG [12, 34, 35]. Диапазон параметров агрессивности атмосферы мест испытаний охватывает практически весь спектр коррозионной активности атмосфер по всему миру. Независимо от типа атмосферы и ее агрессивности величины  $b$  приняты равными 0,523; 0,813; 0,667 и 0,728 для Ст3, Zn, Cu и Al соответственно.

Представленные одинаковые величины коэффициента  $b$ , зависящего от условий окружающей среды, для всех типов и агрессивности атмосферы, а также время стабилизации, равного 20 годам, едва ли оправдано. Зарубежные исследователи в своих работах свидетельствовали, что стационарное состояние, достигается через 4–8 лет [36, 37], когда скорость коррозии не постоянная, а ее снижение для годового прироста времени экспозиции составляет  $\leq 10\%$ , и для установившейся стадии изменение скорости коррозии за год  $\leq 10\%$  [38]. Р. Albrecht и соавторы в обзоре [39] представили результаты продолжительных коррозионных испытаний сталей в местах с разным типом атмосфер (сельская, промышленная и морская). Результаты свидетельствуют, что коррозионные поражения углеродистой стали в отдельных местах превышают значения по закону, представленному в стандарте ISO 9224 [11], т. е. в стандарте ISO 9224 недооценены значения коррозионных поражений. Несмотря на издание в 2012 г. стандарта [11], как нормативного документа для предсказаний долговременных коррозионных потерь, в 2013 г. М. Morcillo и др. в работе [38] показал для многих мест недостоверность прогноза по [11] и поставил задачу оценить

время стабилизации ( $\tau_{\text{стаб}}$ ). S. Feliu и соавторы [40] для оценки величины коэффициента ( $b$ ) для стали, цинка и меди предложили модели на основе параметров агрессивности атмосферы.

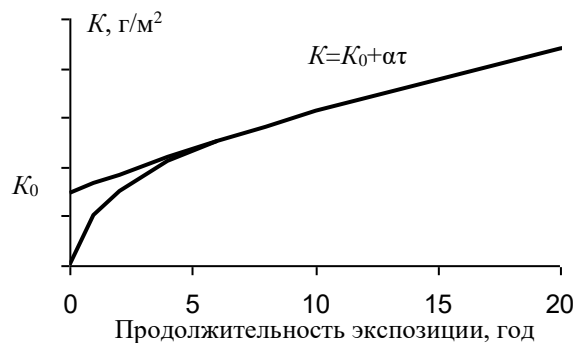
Ю.М. Панченко и др. в работе [41] на основе анализа изменения во времени коррозионных потерь ( $K$ , г/м<sup>2</sup>), привеса/убыли массы ( $\Delta M$ , г/м<sup>2</sup>), массы удержанных продуктов коррозии ( $m$ , г/м<sup>2</sup>) при 10-летних испытаниях во Владивостоке и 17-летних в Мурманске углеродистой стали, Zn, Cu и Al [42] показали, что, изменяясь нелинейно в первые годы, эти величины линейно зависят от времени спустя 6 лет. Учитывая, что коррозионные потери линейно связаны с  $m$  и  $\Delta M$  [43]:

$$K = m - \Delta M \quad (18)$$

можно утверждать, что  $K$  с 6 лет также линейно увеличивается во времени, что является эмпирическим подтверждением начала стационарной стадии коррозионного процесса с 6 лет. С наступлением стационарной стадии линейное увеличение коррозионных потерь во времени ( $\tau$ , год) может быть выражено:

$$K = K_0 + \alpha\tau, \quad (19)$$

где  $K_0$  – потеря массы, полученная экстраполяцией линейной зависимости (19) на  $\tau = 0$  (Рисунок 8),  $\alpha$  – годовой прирост коррозионных потерь.



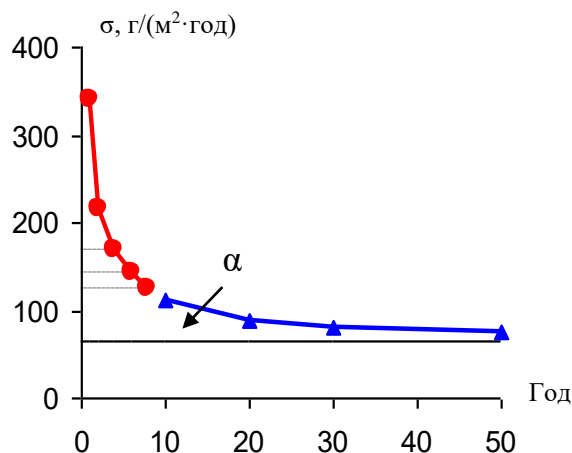
**Рисунок 8.** Линейный участок стационарной стадии коррозионного процесса и его экстраполяция на  $\tau = 0$ .

Такой подход к представлению стационарной стадии коррозионного процесса позволяет выразить скорость коррозии ( $\sigma$ ) на линейном участке и предельную скорость коррозии ( $\alpha$ ):

$$\begin{aligned} \sigma &= K_{\tau} / \tau, \\ \sigma &= K_0 / \tau + \alpha. \end{aligned} \quad (20)$$

При  $\tau \rightarrow \infty$   $K_0/\tau \rightarrow 0$ ,  $\sigma \rightarrow \alpha$ , т. е.  $\alpha$  является не только годовым приростом массопотери в стационарной стадии, но и предельной скоростью коррозии металла. Следовательно, на стационарной стадии постоянным является годовой прирост коррозионных потерь, а скорость коррозии не постоянна, она со временем уменьшается за счет уменьшения

величины  $K_0/\tau$ , стремясь к предельной величине  $\alpha$ , что показано для примера на Рисунке 9.



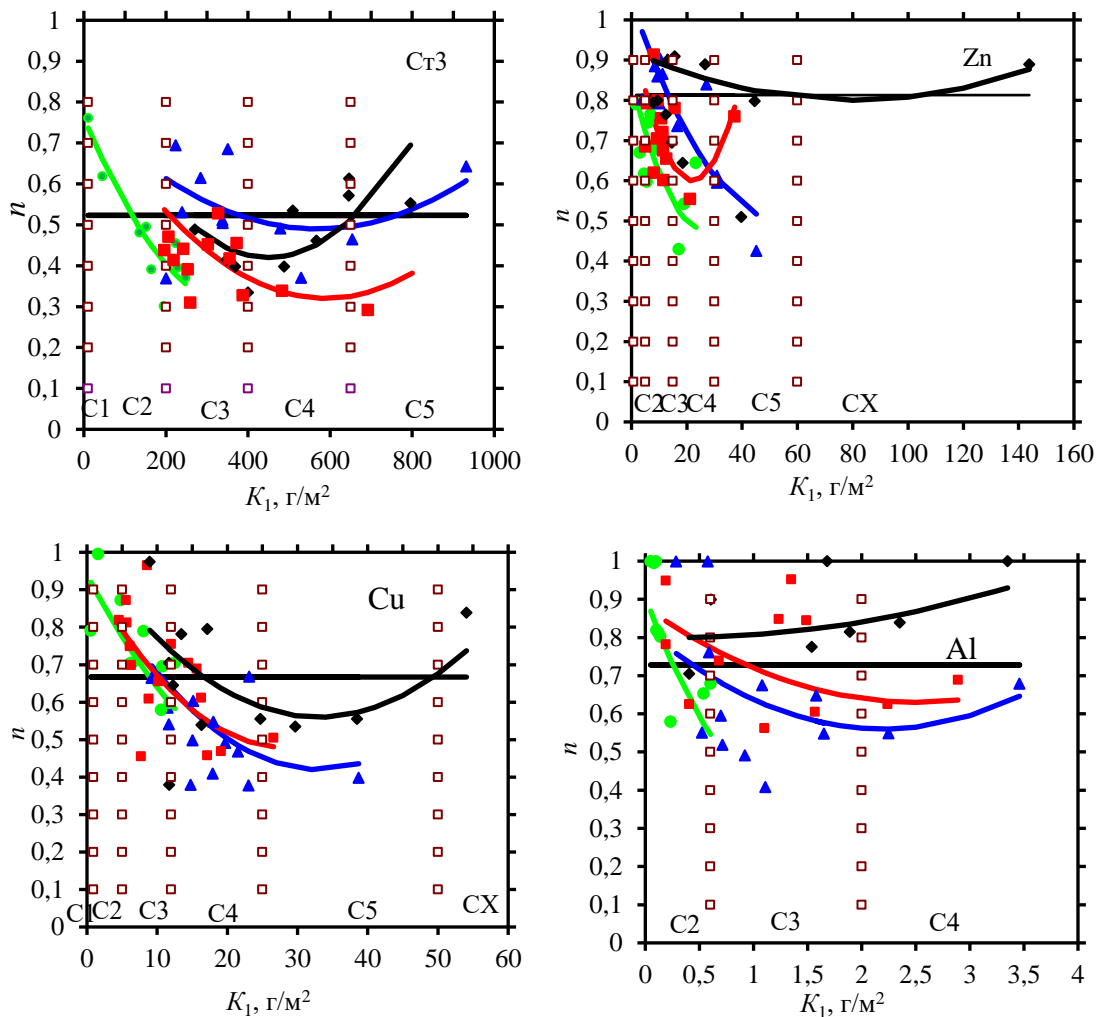
**Рисунок 9.** Изменение скорости коррозии на начальной стадии (●) и на линейной стадии после 10 лет (▲).  $\alpha$  – предельная скорость коррозии.

Таким образом, показано, что в отличие от стандарта ISO 9224 [11] стационарная стадия начинается спустя 6 лет и на стационарной стадии скорость коррозии не постоянная, а со временем уменьшается, стремясь к предельной величине  $\alpha$ .

Yu.M. Panchenko и A.I. Marshakov в работе [44] на основе анализа базы данных ISO CORRAG [12, 34, 35] для 53 мест с различным типом атмосферы предложили для каждого металла уравнения расчета величин  $n$ . Учитывая, что на начальной стадии коррозия подчиняется степенному закону, для каждого места величина  $n$  рассчитана путем линейной аппроксимации зависимостей  $\ln K$  от  $\ln t$  в соответствии с уравнением (21):

$$\ln K = \ln K_1 + n \ln \tau. \quad (21)$$

При разбросе экспериментальных точек за счет непостоянства годовых параметров агрессивности, для отдельных мест сделана корректировка  $K_1$ . По величинам  $K_1$  и рассчитанных  $n$  для типов атмосферы (сельская – С, городская – Г, морская – М, промышленная – П) для всех металлов получены стохастические связи  $n = f(K_1)$  (Рисунок 10). Величина  $K_1$  в данном случае использована в качестве единого параметра агрессивности атмосферы, учитывая, что по ее величине определяется категория коррозионной агрессивности в соответствии с стандартом ISO 9223 [10]. Величины  $n$  и  $b$  по ISO 9223 [10] для всех металлов, представленные на этом рисунке, для многих мест имеют существенное отличие. Надо отметить, что зависимость  $n$  от  $K_1$ , найденная для определенного типа атмосферы, достаточно условная.



**Рисунок 10.** Зависимость коэффициента  $n$  от агрессивности атмосферы, выраженной коррозионными потерями за первый год ( $K_1$ ), для Ст3, Zn, Cu и Al в С (●), I (■), М (▲), Г(Π)-М (◆) атмосферах. Горизонтальные линии – величины  $b$  по [10] для каждого металла и □ - вертикальные столбцы для отметки категорий коррозионной агрессивности атмосферы.

Связь  $n = f(K_1)$  для каждого типа атмосферы в первом приближении может быть описана уравнением (22):

$$n = A(B \cdot K_1 - C)^2 + D, \tag{22}$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  – константы, величины которых даны в Таблице 11. Отметим, что зависимости получены для  $K_1$  в пределах наблюдаемых для каждого типа атмосфер, поэтому их применение для  $K_1$  существенно выходящих за эти пределы, может привести к  $n > 1$  или  $\gg 1$ .

**Таблица 11.** Величины коэффициентов, входящих в уравнение (22), для расчета  $n$ .

Металл	Тип атмосферы	$A$	$B$	$C$	$D$
Ст3	С	3,2	0,001	0,38	0,30
	Г	1,4	0,001	0,59	0,32
	М	0,9	0,001	0,57	0,49
	Г(П)-М	2,3	0,001	0,45	0,42
Zn	С	5,5	0,01	0,26	0,48
	Г	7,8	0,01	0,22	0,60
	М	1,8	0,01	0,55	0,50
	Г(П)-М	0,19	0,01	0,80	0,80
Cu	С	6	0,01	0,30	0,40
	Г	5,9	0,01	0,30	0,48
	М	4,9	0,01	0,33	0,42
	Г(П)-М	4,0	0,01	0,33	0,56
Al	С	0,30	1,0	1,3	0,40
	Г	4,0	0,1	0,25	0,63
	М	5,4	0,1	0,22	0,56
	Г(П)-М	1,3	0,1	0,03	0,78

Прирост коррозионных потерь на стационарной стадии  $\alpha$  является мгновенной скоростью ( $\sigma_{\text{мг}}$ ), которую можно вычислить по уравнению (23):

$$\alpha = \sigma_{\text{мг}} = d(K_1 \cdot \tau^n) / d\tau = K_1 \cdot n \cdot \tau^{n-1}. \quad (23)$$

Считая время стабилизации  $\tau_{\text{сб}} = 6$  годам, долговременные коррозионные потери на начальной стадии рассчитывают по уравнению (24), а на стационарной стадии по уравнению (25):

$$K = K_1 \cdot \tau_1^n, \quad (24)$$

$$K = K_6 + \alpha(\tau_2 - 6) = K_6 + K_1 \cdot n \cdot \tau_1^{n-1} (\tau_2 - 6), \quad (25)$$

где  $K_1$  – коррозионные потери,  $\text{г}/\text{м}^2$ ;  $\tau_1$  – время экспозиции, годы:  $\tau_1 \leq 6$ ;  $\tau_2$  – время экспозиции, годы:  $\tau_2 > 6$ ;  $n$  – параметр, характеризующий защитные свойства продуктов коррозии;  $K_1 \cdot \tau_1^n$  – коррозионные потери на начальной стадии при  $\tau_1 \leq 6$ ;  $\alpha$  – годовой прирост коррозионных потерь на стационарной стадии,  $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ;  $K_6$  – коррозионные потери на начальной стадии при  $\tau = 6$ ,  $\text{г}/\text{м}^2$ .

## Картографирование территории РФ по коррозионным потерям за разные сроки

Целью построения карт является оценка уровня коррозионной агрессивности атмосферы в разных регионах применительно к конструкционным металлам и оценка долговременных коррозионных эффектов за разные годы. Решение проблемы картографирования связано с выполнением ряда важных задач:

- сбор и систематизация данных окружающей среды;
- выбор масштаба и способа представления данных на картах.

**Картографирование территории по метеорологическим параметрам** является основой для прогнозной оценки коррозионной стойкости основных технических металлов, т. к. позволяет в первом приближении оценить жесткость «атмосферной нагрузки».

Непрерывная регистрация климатических параметров, в том числе температуры, относительной влажности воздуха и осадков, проводилась на территории СССР в течение более 100 лет на большом количестве метеостанций. Непосредственно на территории России на 6750 метеостанциях, расположенных в разных географических точках России. Были использованы многолетние среднегодовые параметры мест наблюдения из «Справочников по климату СССР», в выпусках, соответствующих административным подразделениям России, и частях, соответствующих климатическим явлениям: температуре ( $T$ ) и относительной влажности ( $RH$ ) воздуха, осадкам ( $Prec$ ) (ссылки на справочники не предоставляются из-за их большого количества).

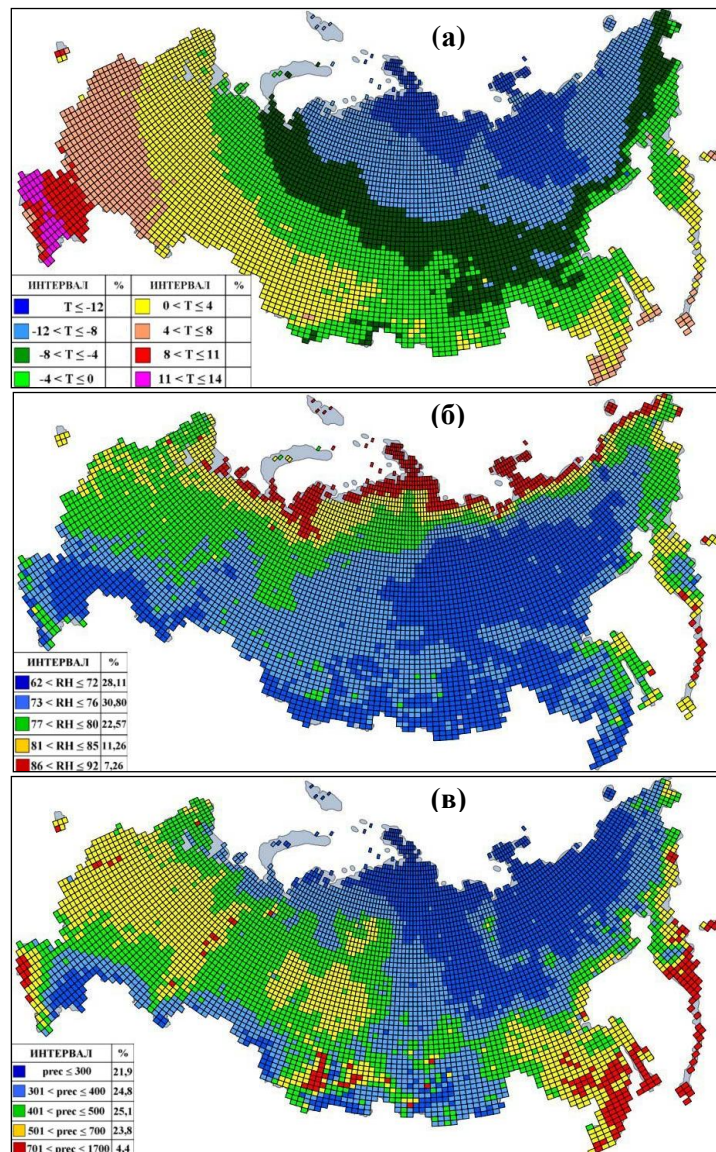
Сотрудниками ИФХЭ РАН была создана база метеоданных ( $T$ ,  $RH$ ,  $Prec$ ) для 6750 мест наблюдений. Большое количество мест наблюдения позволило провести картографирование территории в масштабе  $0,5^\circ$  широты  $\times$   $1^\circ$  долготы. Были определены координаты расположения метеостанций. На основании координат, многолетние среднегодовые данные мест наблюдения систематизированы по территориям в масштабе  $0,5^\circ$  географической широты на  $1^\circ$  долготы (далее ячейки), выбранной для картографирования. Общее количество ячеек составляло 6213. Несмотря на большое количество мест наблюдения, некоторые ячейки, в основном в Сибири и на Дальнем Востоке, не были охвачены метеорологическими наблюдениями. Данные для этих ячеек были получены путем интерполяции. Таким образом, полученные 6213 наборов климатических параметров составили базу метеоданных ИФХЭ РАН. Интервал наблюдаемых на территории России многолетних среднегодовых метеопараметров дан в Таблице 12.

База данных включает среднегодовую температуру воздуха, значение которой на территории России было увеличено на  $1,5^\circ\text{C}$ , чтобы учесть глобальное потепление [45].

Картографирование территории России по метеопараметрам [46], выполненное сотрудниками Института, представлено на Рисунке 11.

**Таблица 12.** Диапазон многолетних среднегодовых метеорологических параметров, наблюдаемых на территории России, их символы, единицы измерения.

Символ	Параметр	Интервал
$T$	Температура воздуха, °C	От -16,6 до +14,7
$RH$	Относительная влажность, %	От 57 до 92
$Prec$	Количество осадков, мм/год	От 120 до 2502



**Рисунок 11.** Картографирование территории РФ по метеорологическим параметрам: среднегодовой температуре (а) и относительной влажности (б) воздуха, суммарному за год количеству осадков (в).

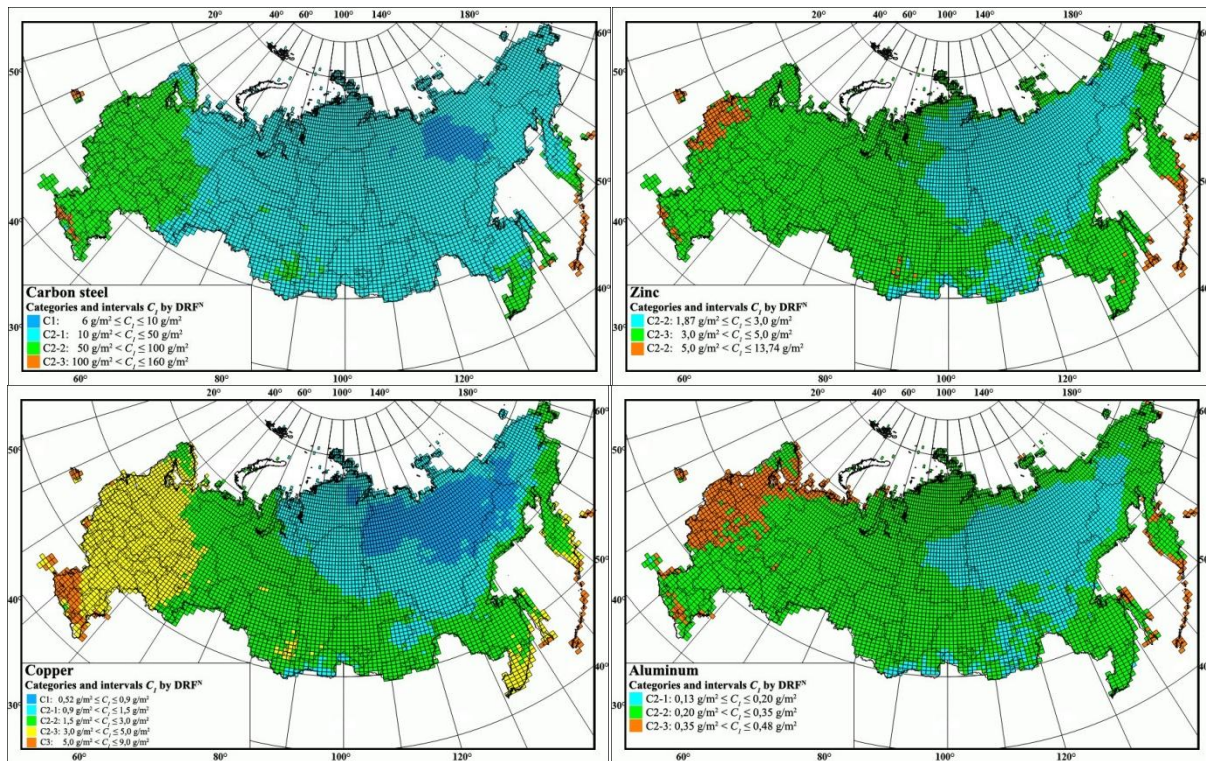
### Картографирование континентальной территории по оценочным категориям коррозионной агрессивности атмосферы

Согласно проведенным испытаниям по программам РФ коррозионная агрессивность атмосферы в основном составляет категорию С2. Учитывая это, для этой категории Ю.М. Панченко и др. [24] предложили дополнительные градации с величинами значений  $K_1^{\text{пр}}$  в определенных интервалах (Таблица 13).

В соответствии с ГОСТ [27] категории коррозионной агрессивности атмосферы по отношению к каждому металлу определяют по  $K_1^{\text{экв}}$ . Ввиду их отсутствия, для каждой ячейки были по ФДОН (уравнения (11)–(14)) рассчитаны  $K_1^{\text{пр}}$  с использованием пакета метеорологических параметров для каждой ячейки. Ячейки с  $K_1^{\text{пр}}$  объединены в соответствии интервалам величин каждой градации. Величины  $K_1^{\text{пр}}$  рассчитаны только для континентальной территории, считая  $[Cl] = 0$ . Величины  $[SO_2]$  приняты равными  $5 \text{ мкг/м}^3$ , учитывая, что во всех городах, за исключением отдельных, концентрация диоксида серы не превышает  $5 \text{ мкг/м}^3$ . Карты оценочных категорий не предназначены для приморских территорий, удаленных на 1,5–2 км от берега, ввиду отсутствия данных по  $[Cl]$ , а также для высокогорных районов. Карты оценочных категорий агрессивности атмосферы по отношению к каждому металлу представлены на Рисунке 12.

**Таблица 13.** Категории С1–С3, и дополнительные градации С2 (С2-1, С2-2 и С2-3) коррозионной агрессивности атмосферы и соответствующие им коррозионные поражения металлов.

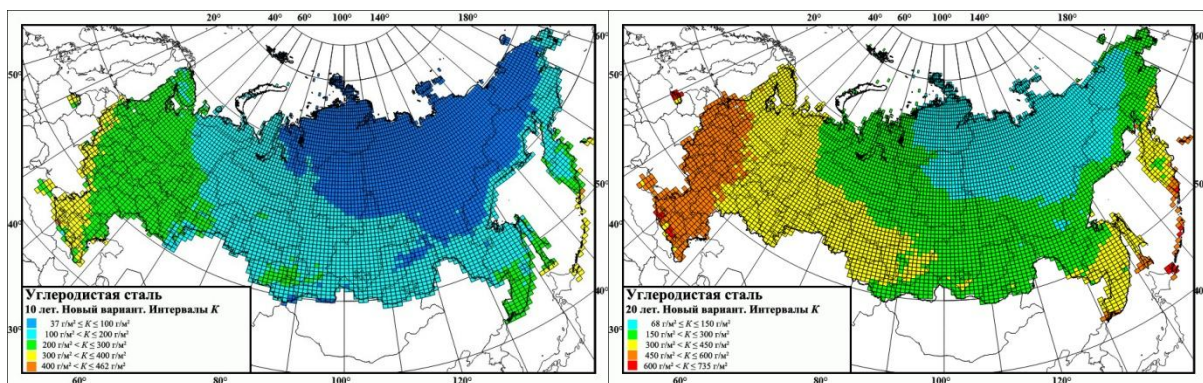
Категория	Коррозионные потери металлов за первый год, $K_1$				
	Единицы	Углеродистая сталь	Цинк	Медь	Алюминий
С1	г/м <sup>2</sup>	$K_1 \leq 10$	$K_1 \leq 0,7$	$K_1 \leq 0,9$	незначительная
	мкм	$K_1 \leq 1,3$	$K_1 \leq 0,1$	$K_1 \leq 0,1$	–
С2-1	г/м <sup>2</sup>	$10 < K_1 \leq 50$	$0,7 < K_1 \leq 1,5$	$0,9 < K_1 \leq 1,5$	$K_1 \leq 0,2$
	мкм	$1,3 < K_1 \leq 6,4$	$0,1 < K_1 \leq 0,24$	$0,1 < K_1 \leq 0,17$	–
С2	г/м <sup>2</sup>	$50 < K_1 \leq 100$	$1,5 < K_1 \leq 3,0$	$1,5 < K_1 \leq 3,0$	$0,2 < K_1 \leq 0,35$
	мкм	$6,4 < K_1 \leq 12,8$	$0,24 < K_1 \leq 0,42$	$0,17 < K_1 \leq 0,34$	–
С2-3	г/м <sup>2</sup>	$100 < K_1 \leq 200$	$3,0 < K_1 \leq 5$	$3,0 < K_1 \leq 5$	$0,35 < K_1 \leq 0,6$
	мкм	$12,8 < K_1 \leq 25$	$0,42 < K_1 \leq 0,7$	$0,34 < K_1 \leq 0,6$	–
С3	г/м <sup>2</sup>	$200 < K_1 \leq 400$	$5 < K_1 \leq 15$	$5 < K_1 \leq 12$	$0,6 < K_1 \leq 2$
	мкм	$25 < K_1 \leq 50$	$0,7 < K_1 \leq 2,1$	$0,6 < K_1 \leq 1,3$	–



**Рисунок 12.** Карты континентальной территории России по оценочным категориям коррозионной агрессивности атмосферы при  $[\text{SO}_2] = 5 \text{ мкг/м}^3$  по отношению к стали, цинку, меди и алюминию [24].

*Картографирование континентальной территории по коррозионным потерям металлов за разные сроки*

Ю.М. Панченко и др. в работе [46] представили карты России по долговременным коррозионным потерям металлов  $K$  за разные сроки. Величины  $K$  были рассчитаны для каждой ячейки по уравнениям (24) и (25). Ячейки объединены по величинам  $K$  в некоторых произвольно выбранных интервалах. Для примера карты прогнозных коррозионных потерь металлов за 10 и 20 лет представлены на Рисунке 13.



**Рисунок 13.** Карты континентальной территории РФ по прогнозным коррозионным потерям (г/м<sup>2</sup>) металлов за 10 и 20 лет.

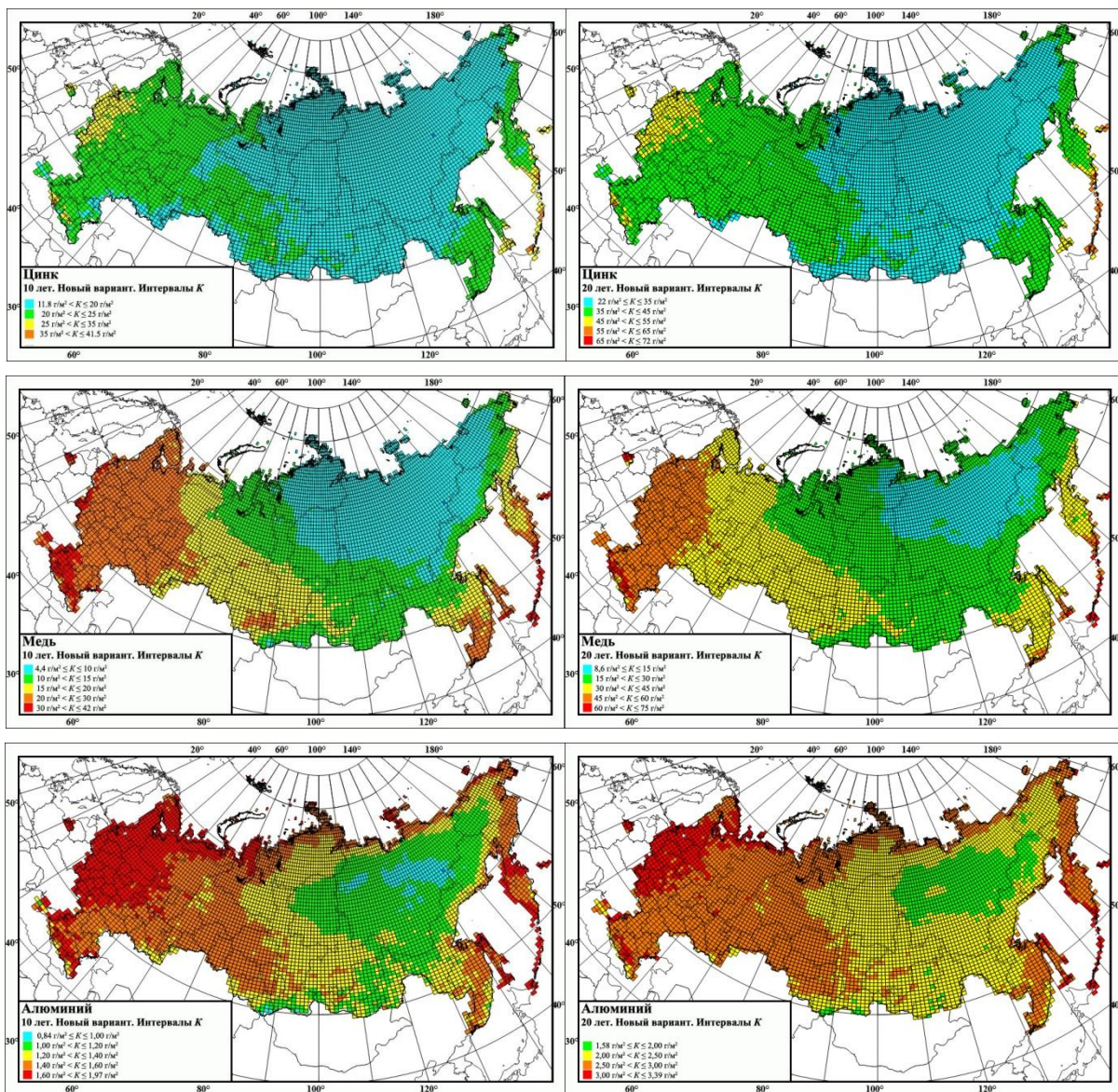


Рисунок 13. Продолжение.

## Заключение

К настоящему времени разработаны достаточно достоверные модели атмосферной коррозии типовых конструкционных металлов. Используя эти модели, можно оценить категорию агрессивности атмосферы по отношению к данному металлу, предсказать коррозионную стойкость при его длительной эксплуатации в различных климатических условиях, разработать карты территорий в различных географических масштабах по коррозионным потерям/поражениям металла за разные периоды времени.

Вместе с тем, следует отметить ряд актуальных задач в области прогнозирования атмосферной коррозии.

Необходимо совершенствовать методы предсказания коррозионных потерь металлов в морской/приморской атмосфере. Для этого, с одной стороны, надо совершенствовать методику проведения натуральных испытаний материалов (как было отмечено выше), с другой стороны, разработать количественные модели, связывающие скорость осаждения аэрозоли морской воды на поверхность материала с многочисленными факторами, влияющими на нее [47, 48].

Для повышения точности прогноза величин  $K$  типовых металлов необходимо изучить влияние на их коррозию дополнительных факторов, которые не учитываются в существующих моделях. Число таких факторов достаточно велико, однако для практического применения прогнозных моделей необходимо, чтобы величины дополнительных параметров были известны в месте эксплуатации материала, то есть они должны измеряться на метеорологических станциях или в пунктах контроля за качеством воздуха.

Необходимо расширять круг металлических материалов и средств их защиты, коррозионную стойкость которых или эффективность действия которых можно будет предсказывать на основании прогнозных моделей без проведения длительных коррозионных испытаний в местах эксплуатации изделий/конструкций.

Очевидно, что для решения данных задач необходимо проведение комплекса исследований и, прежде всего, проведение натуральных коррозионных испытаний новых материалов в различных климатических зонах страны, типах атмосферы и условиях экспозиции материала.

## Финансирование

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

## Список литературы

1. П.В. Стрекалов, А.А. Михайлов и Ю.М. Панченко, Атмосферная коррозия металлов в зонах с тропическим и субтропическим климатом. 1. Характеристики климатических факторов, воздействующих на коррозию (начало), *Коррозия: материалы, защита*, 2005, № 3, 2–8.
2. П.В. Стрекалов, А.А. Михайлов, Ю.М. Панченко и Э.Г. Васильева, Атмосферная коррозия металлов в зонах с тропическим и субтропическим климатом. 1. Характеристики климатических факторов, воздействующих на коррозию (окончание), *Коррозия: материалы, защита*, 2005, № 4, 2–9.
3. А.А. Михайлов, П.В. Стрекалов, Ю.М. Панченко и Э.Г. Васильева, Атмосферная коррозия металлов в зонах с тропическим и субтропическим климатом. 2. Характеристики климата и коррозионных эффектов на основе современных данных, *Коррозия: материалы, защита*, 2006, № 6, 2–11.

4. А.А. Михайлов, П.В. Стрекалов и Ю.М. Панченко, Атмосферная коррозия металлов в зонах с холодным и очень холодным климатом. Обзор, *Коррозия: материалы, защита*, 2007, № 7, 1–16.
5. П.В. Стрекалов, А.И. Маршаков, А.А. Михайлов и Ю.М. Панченко, История развития коррозионных исследований в Институте физической химии РАН. Ч. I. Коррозия металлов и сплавов в природных условиях, *Коррозия: материалы, защита*, 2005, № 11, 2–8.
6. П.В. Стрекалов, А.И. Маршаков, А.А. Михайлов и Ю.М. Панченко, История развития коррозионных исследований в Институте физической химии РАН. Ч. II. Коррозия металлов и сплавов в природных условиях, *Коррозия: материалы, защита*, 2005, № 12, 2–8.
7. А.А. Михайлов, П.В. Стрекалов и Ю.М. Панченко, Моделирование атмосферной коррозии металлов и картографирование территорий, в сб. *Современные проблемы физической химии*, Юбилейный выпуск к 60-летию ИФХ РАН, М.: Издательский дом «Граница», 2005, 481–497.
8. А.А. Михайлов, П.В. Стрекалов и Ю.М. Панченко, История развития коррозионных исследований в Институте физической химии РАН. Ч. 3. Моделирование коррозии и функции доза–ответ для конструкционных металлов, *Коррозия: материалы, защита*, 2006, № 7, 2–10.
9. А.А. Михайлов, Ю.М. Панченко и Ю.И. Кузнецов, *Атмосферная коррозия и защита металлов*, Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2016, 555 с.
10. ISO 9223:2012(E), *Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation*.
11. ISO 9224:2012(E), *Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Guiding values for the corrosivity categories*.
12. D. Knotkova, K. Kreislova and S.W. Dean, Jr, ISOCORRAG international atmospheric exposure program: Summary of results, West Conshohocken: ASTM International, 2010, 84 p. doi: [10.1520/DS71-EB](https://doi.org/10.1520/DS71-EB)
13. J. Tidblad, V. Kucera and A.A. Mikhailov, *Statistical analysis of 8 year materials exposure and acceptable deterioration and pollution levels*, Stockholm: Swedish Corrosion Institute, 1998, 49 p.
14. J. Tidblad, V. Kucera, A.A. Mikhailov, J. Henriksen, K. Kreislova, T. Yaites, B. Stöckle and M. Schreiner, UN ECE ICP materials: Dose-response functions on dry and wet acid deposition effects after 8 years of exposure, *Water Air Soil Pollut.*, 2001, **130**, 1457–1462. doi: [10.1023/A:1013965030909](https://doi.org/10.1023/A:1013965030909)
15. B.M. Rosales, M.E.M. Almeida, M. Morcillo, J. Uruchurtu and M. Marrocos, *Corrosion y proteccion de metales en las atmosferas de Iberoamerica*, Madrid: Programma CYTED, 1998, 629–660.

16. M. Morcillo, Atmospheric corrosion in Ibero-America. The MICAT project, in *Atmospheric Corrosion*, W.W. Kirk and H.H. Lawson Eds., Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1995, 257–275. doi: [10.1520/STP14924S](https://doi.org/10.1520/STP14924S)
17. Ю.М. Панченко, Л.А. Шувахина и Ю.Н. Михайловский, Атмосферная коррозия металлов в районах Дальнего Востока, *Защита металлов*, 1982, **18**, № 4, 575–582.
18. J. Tidblad, A.A. Mikhailov and V. Kucera, Model for the prediction of the time of wetness from average annual data on relative air humidity and air temperature, *Prot. Met.*, 2000, **36**, no. 6, 533–540. doi: [10.1023/A:1026621009635](https://doi.org/10.1023/A:1026621009635)
19. S. Feliu, M. Morcillo and S. Feliu, The prediction of atmospheric corrosion from meteorological and pollution parameters – I. Annual corrosion, *Corros. Sci.*, 1993, **34**, no. 3, 403–422. doi: [10.1016/0010-938X\(93\)90113-U](https://doi.org/10.1016/0010-938X(93)90113-U)
20. Yu.M. Panchenko and A.I. Marshakov, Prediction of first-year corrosion losses of carbon steel and zinc in continental regions, *Materials*, 2017, **10**, no. 4, 422. doi: [10.3390/ma10040422](https://doi.org/10.3390/ma10040422)
21. Yu.M. Panchenko, A.I. Marshakov, L.A. Nikolaeva and V.V. Kovtanyuk, Prediction of first-year corrosion losses of copper and aluminum in continental regions, *AIMS Mater. Sci.*, 2018, **5**, no. 4, 624–649. doi: [10.3934/matersci.2018.4.624](https://doi.org/10.3934/matersci.2018.4.624)
22. Yu.M. Panchenko, A.I. Marshakov, I.V. Bardin and A.V. Shklyayev, Use of statistical analysis methods for estimating the reliability of first-year carbon steel and zinc corrosion loss predictions calculated using dose-response functions, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2019, **55**, no. 4, 753–760. doi: [10.1134/s2070205119040142](https://doi.org/10.1134/s2070205119040142)
23. Yu.M. Panchenko, A.I. Marshakov, L.A. Nikolaeva and T.N. Igonin, Evaluating the reliability of predictions of first-year corrosion losses of structural metals calculated using dose-response functions for territories with different categories of atmospheric corrosion aggressiveness, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2020, **56**, no. 7, 1249–1263. doi: [10.1134/S207020512007014X](https://doi.org/10.1134/S207020512007014X)
24. Yu. Panchenko, A. Marshakov, T. Igonin, L. Nikolaeva and V. Kovtanyuk, Corrosivity of atmosphere toward structural metals and mapping the continental Russian territory, *Corros. Eng. Sci. Technol.*, 2019, **54**, no. 5, 369–378. doi: [10.1080/1478422X.2019.1594526](https://doi.org/10.1080/1478422X.2019.1594526)
25. Y. Panchenko, A. Marshakov, L. Nikolaeva and T. 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.*, 2020, **55**, no. 8, 655–669. doi: [10.1080/1478422X.2020.1772535](https://doi.org/10.1080/1478422X.2020.1772535)
26. М.Г. Курс, 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.
27. ГОСТ 9.107-2023, ЕСЗКС, Коррозионная агрессивность атмосферы. Общие положения.

- 
28. Yu.M. Panchenko, A.I. Marshakov, L.N. Kudryavtseva and T.N. Igonin, Prediction of atmospheric corrosivity categories with respect to typical metals, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2025, **14**, no. 4, 2201–2231. doi: [10.17675/2305-6894-2025-14-4-25](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2025-14-4-25)
  29. ГОСТ 9.039-74, ЕСЗКС, Коррозионная агрессивность атмосферы. Общие положения.
  30. М.А. Гаврюшина, Ю.М. Панченко и А.И. Маршаков, Модель прогноза коррозионных потерь углеродистой стали за первый год экспозиции на основе алгоритма «случайный лес», *Коррозия: защита материалов и методы исследований*, 2024, **2**, № 1, 41–59. doi: [10.61852/2949-3412-2024-2-1-41-59](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2024-2-1-41-59)
  31. М.А. Gavryushina, A.I. Marshakov and Yu.M. Panchenko, Application of the random forest algorithm of corrosion losses of aluminum for the first year of exposure in various regions of the world, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2023, **59**, no. 1, 85–95. doi: [10.1134/s2070205123700259](https://doi.org/10.1134/s2070205123700259)
  32. L. Breiman, Random forests, *Machine Learning*, 2001, **45**, 5–32. doi: [10.1023/A:1010933404324](https://doi.org/10.1023/A:1010933404324)
  33. Scikit-learn, *Machine learning in Python*. URL: <https://scikit-learn.org/stable/index.html>
  34. D. Knotkova, P. Boschek and K. Kreislova, Results of ISO CORRAG program: Processing of one-year data in respect to corrosivity classification, in *Atmospheric Corrosion*, Eds. W.W. Kirk and H.H. Lawson, West Conshohocken, PA: ASTM International, 1995, 38–55. doi: [10.1520/STP14912S](https://doi.org/10.1520/STP14912S)
  35. S.W. Dean and D.B. Reiser, Analysis of long-term atmospheric corrosion results from ISO CORRAG program, in *Outdoor Atmospheric Corrosion*, Ed. by H.E. Townsend, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2002, 3–18. doi: [10.1520/STP10879S](https://doi.org/10.1520/STP10879S)
  36. I. Díaz, H. Cano, B. Chico, D. de la Fuente and M. Morcillo, Some clarifications regarding literature on atmospheric corrosion of weathering steels, *Int. J. Corros.*, 2012, **2012**, 812192. doi: [10.1155/2012/812192](https://doi.org/10.1155/2012/812192)
  37. D. de la Fuente, I. Díaz, J. Simancas, B. Chico and M. Morcillo, Long-term atmospheric corrosion of mild steel, *Corros. Sci.*, 2011, **53**, 604–617. doi: [10.1016/j.corsci.2010.10.007](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.10.007)
  38. M. Morcillo, B. Chico, I. Díaz, H. Cano, and D. de la Fuente, Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review, *Corros. Sci.*, 2013, **77**, 6–24. doi: [10.1016/j.corsci.2013.08.021](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.08.021)
  39. P. Albrecht and T.T. Hall, Atmospheric corrosion resistance of structural steels, *J. Mater. Civ. Eng.*, 2003, **15**, no. 1, 2–24. doi: [10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:1(2))
  40. S. Feliu, M. Morcillo and S. Feliú, The prediction of atmospheric corrosion from meteorological and pollution parameters – II. Long-term forecasts, *Corros. Sci.*, 1993, **34**, no. 3, 415–422. doi: [10.1016/0010-938X\(93\)90113-U](https://doi.org/10.1016/0010-938X(93)90113-U)

- 
41. Yu.M. Panchenko, A.I. Marshakov, T.N. Igonin, V.V. Kovtanyuk and L.A. Nikolaeva, Long-term forecast of corrosion mass losses of technically important metals in various world regions using a power function, *Corros. Sci.*, 2014, **88**, 306–316. doi: [10.1016/j.corsci.2014.07.049](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.07.049)
42. Ю.М. Панченко, Кинетика гравиметрических параметров коррозионного процесса, *Коррозия: материалы, защита*, 2013, № 4, 1–7.
43. Ю.М. Панченко и П.В. Стрекалов, Образование, удержание и сброс продуктов атмосферной коррозии металлов. Ч. 2. Кинетика коррозии и сброса, *Защита металлов*, 2005, **41**, № 6, 602–613.
44. Yu.M. Panchenko and A.I. Marshakov, Long-term prediction of metal corrosion losses in atmosphere using a power-linear function, *Corros. Sci.*, 2016, **109**, 217–229. doi: [10.1016/j.corsci.2016.04.002](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.04.002)
45. *Изменения климата 2016 год (декабрь 2015 – ноябрь 2016), Обзор состояния и тенденций изменения климата России*, Москва: ФГБУ «Институт Глобального климата и экологии», 2017, 42 с.
46. Y. Panchenko, A. Marshakov, T. Igonin and L. Nikolaeva, Estimation of long-term corrosion resistance of structural metals and mapping the continental territory of the Russian Federation for various time periods, *Corros. Eng. Sci. Technol.*, 2021, **56**, no. 4, 363–371. doi: [10.1080/1478422X.2020.1862967](https://doi.org/10.1080/1478422X.2020.1862967)
47. 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)
48. Ю.М. Панченко, А.И. Маршаков, Л.А. Кудрявцева, В.В. Ковтанюк, Т.А. Ненашева, А.А. Рыбкина, Т.Н. Игонин, А.И. Вдовин и Т.В. Коваль, Предсказания годовых коррозионных потерь конструкционных металлов при экстремально высоких значениях скорости осаждения хлоридов, *Коррозия: защита материалов и методы исследований*, 2025, **3**, № 3, 65–86. doi: [10.61852/2949-3412-2025-3-3-65-86](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2025-3-3-65-86)

---

## **History of the development of metal corrosion research at the institute of physical chemistry and electrochemistry of the Russian Academy of Sciences. The prediction of atmospheric corrosion of structural metals and mapping the continental Russian territory for various time periods**

**Y.M. Panchenko and A.I. Marshakov\***

*A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, 31-4, Leninsky prospect, 119071 Moscow, Russia*

*\*E-mail: [a\\_marshakov@mail.ru](mailto:a_marshakov@mail.ru)*

### **Abstract**

The results of work conducted in the Laboratory of metal corrosion in natural environments over the past 20 years in the area of predicting atmospheric corrosion of metals are reviewed. Atmospheric corrosion models were developed based on statistical processing of data on corrosion mass losses of typical metals (carbon steel, zinc, copper, and aluminum) obtained during large-scale international and Russian programs. Using the developed models, it is possible to assess the aggressiveness category of the atmosphere with respect to a given typical metal, predict its corrosion resistance during long-term operation in various climatic conditions, and develop maps of territories at various geographic scales based on the distribution of estimated corrosion damage over different time periods.

**Keywords:** *atmospheric corrosion, typical metals, atmospheric corrosivity, dose-response function, long-term losses, mapping.*