ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

*К.Л. Восканян, С.В. Крюкова, А.Д. Кузнецов,
О.С. Сероухова, Т.Е. Симакина*

Российский государственный гидрометеорологический университет,
tatiana.simakina@gmail.com

Получены результаты исследования метрологической надежности сетевых автоматических экологических станций Санкт-Петербурга, приведены оценки основных показателей метрологической надежности датчиков загрязняющих веществ: окиси углерода, оксида и диоксида азота. Вычислена вероятность готовности каждой станции к работе в произвольный момент времени, проведено районирование территории Санкт-Петербурга по коэффициенту готовности экологических станций. Выполнены численные эксперименты по оценке влияния пропусков во временном ряду концентрации оксида азота на его статистические параметры.

Ключевые слова: метрологическая надежность, интенсивность отказов, коэффициент готовности, экологические станции, датчики загрязняющих веществ.

TO THE QUESTION OF THE ESTIMATION OF ECOLOGICAL STATIONS METROLOGICAL RELIABILITY

*K.L. Voskanyan, S.V. Kryukova, A.D. Kuznetsov,
O.S. Serouhova, T.E. Simakina*

Russian State Hydrometeorological University

The results of a study of the metrological reliability of network automatic ecological stations in St. Petersburg were obtained; estimates were given of the main indicators of the pollutants sensors metrological reliability: carbon monoxide, oxide and nitrogen dioxide. The probability of readiness of each station to work at any time is calculated, zoning of the territory of St. Petersburg by the coefficient of readiness of environmental stations is carried out. Numerical experiments were carried out to assess the effect of gaps in the time series of nitric oxide concentration on its statistical parameters.

Keywords: metrological reliability, failure rate, availability factor, environmental stations, pollutant sensors.

Введение

Оценка экологической ситуации в промышленно развитом регионе, выявление аномалий и определение причин их возникновения, прогноз состояния водного бассейна опираются на данные наблюдений станций, входящих в сеть экологического мониторинга (рис. 1). От решений, которые принимаются на основе предоставляемых наблюдений, различных генерализаций экологической информации и аналитических обобщений по экологическому состоянию города

Рис. 1. Блок-схема системы экологического мониторинга среды [7].

в целом, ежедневно зависят здоровье и жизнь людей. Этот факт демонстрирует высокую роль надежности экологических станций в устойчивом развитии экономики и общества [1—3].

Датчики концентраций загрязняющих веществ (ЗВ) эксплуатируются в условиях открытой атмосферы, зачастую в зонах повышенного загрязнения воздуха, поэтому испытывают негативное влияние на внутреннюю структуру, а иногда и на химический состав, что приводит к изменению их рабочих свойств, развитию необратимых процессов износа, старения, накоплению усталостных явлений и отказам [4]. Отказы вызывают пропуски во временных рядах значений концентрации ЗВ. Игнорирование пропусков искажает статистические параметры ряда — среднее, дисперсию, вариацию и др., повышает ошибку интерполяции измеренных данных сети станций и, следовательно, понижает точность оценки уровня загрязнения воздушного бассейна города в целом [5, 6, 8].

Целью настоящей работы является исследование метрологической надежности экологических автоматических датчиков, которыми оборудованы современные сети экологического мониторинга. На основе знания о метрологической надежности можно планировать мероприятия, направленные на повышение эффективности использования предоставляемой экологической информации.

Исходные данные

Исходным материалом для исследования послужили показания трех автоматических газоанализаторов — окиси углерода, оксида и диоксида азота. Датчики ЗВ размещены на двадцати станциях, входящих в состав сети экологического мониторинга Санкт-Петербурга. Местоположение станций представлено на рис. 2. Длительность временных рядов концентрации окиси углерода, оксида и диоксида азота составляла полгода (182 дня), что соответствовало 13 104 значениям, измеренным с интервалом 20 минут.

Рис. 2. Сеть экологических станций Санкт-Петербурга.

Метрологическая надежность средств измерений

Отказ экологических и метеорологических датчиков, возникающий в процессе их эксплуатации, является случайным событием, связанным с нарушением или прекращением работоспособности средства измерения. В настоящей работе исследовались внезапные отказы, характеризующиеся скачкообразным изменением показаний. Такие отказы можно обнаружить в ходе эксплуатации прибора без проведения поверки, т.е. по характеру проявления они являются явными. Их особенность заключается в постоянстве во времени интенсивности отказов, что дает возможность применять для анализа этих отказов классическую теорию надежности. Для характеристики безотказности приборов были вычислены следующие параметры:

интенсивность отказов

$$\lambda = \frac{L}{N \cdot \Delta t}, \quad (1)$$

где L — число отказов за промежуток времени Δt , N — число однотипных датчиков;

вероятность безотказной работы

$$P(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(t) dt \right\} = e^{-\lambda t}; \quad (2)$$

вероятность отказа

$$Q(t) = 1 - P(t); \quad (3)$$

средняя наработка на отказ

$$T_{CP} = - \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{1}{\lambda}; \quad (4)$$

коэффициент готовности

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{CP}}{T_{CP} + T_B}, \quad (5)$$

где T_B — время восстановления датчика, которое вычислялось как отношение времени простоя датчика к числу его отказов.

Надежность экологических датчиков

Для исследования пропусков во временных рядах концентрации ЗВ, которые интерпретировались как отказы аппаратуры, создан макрос, выполняющий следующие функции:

- поиск разрывов в рядах,
- фиксация времени появления отказов,
- вычисление числа отказов каждого датчика на каждой станции,
- вычисление периодов простоя.

Примеры результатов работы макроса представлены на рис. 3. Диаграммы на данном рисунке отражают надежность экологических датчиков на двух станциях. Период безотказной работы на станции № 2 в Колпино составил 79 % общего времени, на станции № 19 на пр. Жукова — лишь 55 %. Чаще всего на станции № 2 отказывал датчик диоксида азота (9 % общего времени работы), реже — датчик оксида азота (5 %). На станции № 19 датчики NO, NO₂ и CO не работали 18, 16 и 11 % времени соответственно.

Результаты исследования отказов по всем станциям представлены диаграммой на рис. 4. В целом по городу период безотказной работы датчиков ЗВ составил 71,3 % общего времени работы. Меньшее время простоя оказалось у датчика CO (7,7 %), дольше всего не работал датчик NO (11,4 %), промежуточное положение у датчика NO₂ (9,5 %).

Рис. 3. Диаграммы, отражающие периоды безотказной работы и отказов датчиков ЗВ.

Рис. 4. Периоды безотказной работы и отказов датчиков ЗВ по всем станциям.

1 — отказ датчика CO, 2 — отказ датчика NO, 3 — отказ датчика NO₂, 4 — работа без отказов.

На основе результатов работы макроса вычислены показатели метрологической надежности (табл. 1): средняя наработка на отказ, время восстановления, интенсивность отказов и коэффициент готовности.

Таблица 1

Результаты оценки надежности датчиков ЗВ по 20 станциям

Показатель надежности	Датчик		
	CO	NO	NO ₂
Время работы датчиков, ч	241909	232087	237074
Время простоя датчиков, ч	5042,8	7498,3	6251,5
Наработка на отказ, ч	65,10	42,54	109,15
Интенсивность отказов, ч ⁻¹	0,015	0,024	0,009
Время восстановления, ч	5,4	5,5	11,5
Интенсивность восстановления, ч ⁻¹	0,184	0,182	0,087
Коэффициент готовности	0,923	0,886	0,905

Рис. 5. Вероятность безотказной работы (слева) и вероятность отказа (справа) трех датчиков ЗВ.

Наиболее надежным за рассматриваемый срок оказался датчик NO₂ — его интенсивность отказов составила 0,009 ч⁻¹. Почти в два раза выше была интенсивность отказов датчика CO (0,015 ч⁻¹) и в три раза выше — датчика NO (0,024 ч⁻¹). Таким образом, датчик окиси углерода практически каждые 65 часов работы на одной из станций дает сбой, датчик оксида азота — каждые 42,5 часа, датчик диоксида азота — каждые 109 часов.

Представленные в таблице значения позволяют прогнозировать вероятность безотказной работы (ВБР) датчиков. В предположении, что распределение времени между отказами подчиняется экспоненциальному закону, графики ВБР каждого датчика и вероятности его отказа будут иметь вид, показанный на рис. 5. Из рисунка видно, что быстрее всего снижается надежность у датчика NO.

Из данных, приведенных на рисунке, можно сделать вывод, что при отсутствии ремонта и замены из шестидесяти датчиков трех видов через 100 часов работы отказали бы двенадцать датчиков NO₂, шестнадцать датчиков CO и восемнадцать датчиков NO.

Если сравнивать датчики по интенсивности восстановления, то датчик NO₂ оказался на последнем месте (0,087 ч⁻¹). У двух других датчиков этот параметр в два раза выше (более 0,18 ч⁻¹).

Коэффициент готовности включает в себя информацию об отказах, а также о продолжительности ремонта или замены, поэтому является комплексной, наиболее эффективной характеристикой надежности. Согласно полученным значениям, вероятность того, что датчики CO, NO₂ и NO окажутся в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, составляет 92, около 91 и 89 % соответственно.

Результаты работы экологических станций

В ходе работы исследовались не только надежность технических средств разных типов, но и надежность станций в целом, а также влияние расположения станции на надежность. Показатели безотказности станций представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки надежности станций

Номер станции	Адрес станции	Число отказов	Время простоя, ч	Средняя наработка на отказ, ч	Время восстановления, ч	Коэффициент готовности
1	ул. Проф. Попова, д. 48	165	2761	768,17	57,43	0,93
2	г. Колпино, ул. Красная, д. 1А	37	814	3125,88	66,12	0,98
3	ул. Карбышева, д. 7	38	687	3504,62	62,58	0,98
4	Малоохтинский пр., д. 98	99	8086	1027,13	274,03	0,79
5	пр. Маршала Жукова, д. 30, корп. 3	210	5557	781,90	104,01	0,88
6	В.О., ул. Веселая, д. 6	86	3600	1272,98	128,97	0,91
7	ул. Шпалерная, д. 56	309	798	382,13	7,57	0,98
8	ул. Королева, д. 36, корп. 8	249	5466	858,35	151,34	0,85
9	Малая Балканская ул., д. 54	138	6520	1041,82	206,18	0,83
10	Московский пр., д. 19	290	5834	892,37	124,35	0,88
11	г. Сестрорецк, ул. М. Горького, д. 2	54	3823	2334,66	244,47	0,91
12	ул. Пестеля, д. 1	65	1735	2393,98	109,63	0,96
13	шоссе Революции, д. 84	219	3839	2175,58	100,21	0,96
14	г. Зеленогорск, пляж «Золотой», д. 1	190	3614	572,37	56,58	0,91
15	Кронштадт, ул. Ильмянинова, д. 4	139	4057	834,53	94,14	0,90
16	ул. Проф. Попова, д. 48	144	6214	1392,18	236,72	0,85
17	г. Колпино, ул. Красная, д. 1А	33	196	5800,31	11,03	1,00
18	-ул. Севастьянова, д. 11	49	4220	2592,82	294,91	0,90
19	г. Пушкин, Тиньков пер., д. 4	228	5911	487,22	85,30	0,85
20	ул. Ольги Форш, д. 6	92	1438	2234,43	61,16	0,97

Число отказов и время простоя каждой станции представлены на рис. 6. Станции заметно различаются по этим показателям. Так, например, на станции № 14 в Зеленогорске было мало отказов (4 % общего числа), однако они приводили к большому времени простоя. Обратная картина наблюдалась на станции № 7 на Шпалерной улице: самые частые отказы соответствовали самому короткому времени простоя. Станция № 8 на ул. Королева отличается многочисленными сбоями и длительными периодами простоя.

На рис. 6 представлен комплексный коэффициент готовности (K_r), учитывающий повторяемость отказов и время восстановления всех приборов на станции (кривая 1). Из рисунка видно, что самой надежной является станция № 17 в Пушкине ($K_r = 0,99$), самой ненадежной — станция № 4 в РГГМУ на Малоохтинском пр. ($K_r = 0,78$). Такое расхождение можно объяснить расположением станции РГГМУ в условиях городской и промышленной застройки, близостью

Рис. 6. Число отказов N , время простоя $T_{\text{пр}}$ и коэффициент готовности K_r станций.

транспортной магистрали с интенсивным движением, негативно влияющих на измерительные устройства. В отличие от нее станция в Пушкине находится за пределами городской черты.

Для исследования особенностей пространственного распределения коэффициента готовности проведена его интерполяция на территорию Санкт-Петербурга (рис. 7). Область с пониженной надежностью работы станций ожидаемо находится в центре территории. Она содержит три близкие по площади зоны с коэффициентом готовности меньше 0,87: северо-западную, юго-западную и юго-восточную. Внутри последней штриховкой выделены два самых ненадежных очага, в которые входят станции с коэффициентом готовности $K_r = 0,85$. Исключение составляет овальная область на севере, отображаемая на рисунке зеленым цветом. Она образуется показаниями станций № 1, 2, 3, 12 и 13, где $K_r > 0,95$.

С удалением от центра города надежность станций повышается, что особенно заметно на восточной границе города. Такое направление повышения надежности может быть обусловлено тем, что воздушные массы, с которыми связаны неблагоприятные погодные условия, поступают в Санкт-Петербург, прежде всего, с западного и юго-западного направлений.

Рис. 7. Распределение коэффициента готовности (K_r) экологических станций Санкт-Петербурга.

Влияние пропусков во временном ряду на статистические параметры этого ряда

Оценка влияния пропусков во временном ряду на статистические параметры этого ряда выполнялась по результатам проведенного численного эксперимента. Был взят временной ряд концентрации оксида азота, измеренной на станции № 17 Санкт-Петербурга с января по июль. Длина ряда составила 13 010 значений, измеренных с дискретностью 20 мин. Были определены статистические параметры исходного ряда — среднее, медиана, мода, СКО и др. (табл. 3). Далее путем удаления из ряда значений имитировались отказы прибора. Было удалено последовательно от 30 до 2000 (от 0,2 до 15 %) сроков с переменным шагом 30—500. На каждом этапе вычислялась статистика ряда. Результаты моделирования отказов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Статистика временного ряда
концентрации оксида азота в Санкт-Петербурге

Статистика	Исход- ный ряд	Число пропусков							
		30 (0,2%)	60 (0,5%)	90 (0,7%)	180 (1,4%)	300 (2%)	800 (6%)	1500 (12%)	2000 (15%)
Среднее, мкг/м ³	7,104	7,096	7,088	7,073	7,063	7,098	7,077	6,919	6,407
Медиана, мкг/м ³	2,809	2,809	2,809	2,807	2,809	2,817	2,797	2,782	2,782
Мода, мкг/м ³	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427
Стандартное отклонение, мкг/м ³	14,83	14,82	14,81	14,75	14,73	14,78	14,92	14,84	11,66
Дисперсия, (мкг/м ³) ²	220,0	219,6	219,3	217,7	216,9	218,6	222,5	220,3	135,9
Сумма, мкг/м ³	93034	92712	92391	91984	91225	90821	87024	80227	71087

Из таблицы следует, что с увеличением числа пропусков в ряду изменяются все статистические параметры за исключением моды. Средняя концентрация изменяется в разряде десятых уже при наличии 0,2 % пропущенных данных, СКО — при 0,7 % пропусков, медиана — при 6 %.

Влияние пропусков на погрешность определения среднего и СКО отражено на рис. 8. По оси ординат отложена относительная погрешность

Рис. 8. Изменение погрешности определения статистики временного ряда — среднего и СКО — при увеличении числа пропусков во временном ряду концентрации оксида азота, измеренной на станции № 17 Санкт-Петербурга.

определения среднего значения концентрации оксида азота, вычисленная по формуле

$$\delta C_{\text{NO}} = \frac{\bar{C}_{\text{NO}} - C_{\text{NO}}}{\bar{C}_{\text{NO}}} \cdot 100 \%,$$

где $\bar{C}_{\text{NO}}$, C_{NO} — средняя концентрация оксида азота исходного временного ряда без пропусков и ряда с пропусками соответственно.

При числе пропущенных сроков от 1 до 2 % ошибка определения СКО превышает 0,5 %. С увеличением числа пропусков от 7 % и выше возрастает погрешность определения среднего, которая составляет более 2,5 % при 12 % пропущенных сроков наблюдений. Таким образом, отказы датчика оксида азота, приводящие к пропускам во временном ряду концентрации NO, приводят к возникновению ошибок при определении статистических параметров и, следовательно, понижают точность оценок уровня распределения исследуемой величины по изучаемой территории.

Заключение

В результате исследования метрологической надежности автоматических датчиков ЗВ, входящих в состав оборудования экологических станций Санкт-Петербурга, сделаны следующие выводы.

1. За рассматриваемый период работы трех датчиков длительностью 182 дня общее число пропусков в данных датчика окиси углерода составило 929, оксида азота — 1364, диоксида азота — 543.

2. Период времени безотказной работы, т.е. когда ни один датчик не отказал, составил 71,3 % общего времени работы.

3. Наиболее эффективным показателем метрологической надежности является коэффициент готовности, учитывающий информацию как об отказах, так и о ремонте или замене. Коэффициент готовности может быть интерпретирован как прогноз времени работоспособности технических средств. Тогда время работы датчика CO составит 92 % исследуемого периода, датчика NO₂ — около 91 %, NO — 89 %.

4. Коэффициент готовности экологических станций в целом составляет 0,78—0,99. Самыми ненадежными по данному показателю оказались станции, расположенные в западных и центральных районах города. По-видимому, на работу этих станций оказывает влияние большая повторяемость неблагоприятных погодных условий, обусловленная западным и юго-западным переносом. В восточном направлении надежность станций возрастает.

5. Доказано влияние пропусков во временном ряду концентрации оксида азота на статистические параметры этого ряда. При пропуске 12 % измерений погрешность определения среднего превышает 2,5 %.

Список литературы

1. *Бедрицкий А.И.* Влияние погоды и климата на устойчивость и развитие экономики // Бюллетень ВМО. 1999. Т. 48, № 2. С. 215—222.
2. *Бедрицкий А.И., Корицунов А.А., Шаймарданов М.З.* Опасные гидрометеорологические явления и их влияние на экономику России. Обнинск, 2001. 36 с.
3. *Кобышева Н.В., Васильев М.П.* Уязвимость социальной сферы регионов России к опасным гидрометеорологическим явлениям // Труды ГГО. 2015. Вып. 578. С. 59—74.
4. *Кожевников Б.Л.* Методика формальной оценки климатических нагрузок на метеорологические приборы // Труды ГГО. 1990. Вып. 529. С. 149—162.
5. *Крюкова С.В., Кузнецов А.Д., Симакина Т.Е.* Оптимизация сети экологического контроля в г. Санкт-Петербурге / В сб.: Гетерогенные системы и процессы в природных и техногенных средах. Атмосферная экология. Материалы международной научно-практической конференции. Часть 3. СПб: Стратегия будущего, 2018. С.37—47.
6. *Крюкова С.В., Симакина Т.Е.* Оценка методов пространственной интерполяции метеорологических данных // Общество. Среда. Развитие. 2018. № 1. С. 144—151.
7. *Кутузов О.И., Татарникова Т.М.* Экологический мониторинг как объект автоматизации управления // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 21. С. 165—171.
8. *Симакина Т.Е., Крюкова С.В.* Пространственный анализ концентраций загрязняющих веществ в атмосфере Санкт-Петербурга // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 43. С.184—194.