

Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 340—357.
Hydrometeorology and Ecology. 2026;(83):340—357.

ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья
УДК 502.175:551.508:556.07
doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-340-357

Территориальные мониторинги гидрометеорологической и экологической обстановки: ситуационно-предиктивная поддержка технических средств наблюдения за воздушной средой

Александр Константинович Беляев, Сергей Иванович Биденко

АО «НПО «Импульс», Санкт-Петербург, Россия, alexbel3101@gmail.com

Аннотация. Разработана геоинформационная методика территориально-предиктивной оценки состояния и прогноза технического состояния средств наблюдения и измерения территориально распределённых мониторингов контроля состояния воздушной среды. Методика объединяет средства геопространственного анализа окружающей среды и аппарат предиктивной аналитики технического состояния приборов и оборудования. Это позволяет оперативно определять, локализовать и прогнозировать сбои и отказы оборудования с учетом воздействия деструктивных факторов внешней и внутренней обстановки; сокращать время технического обслуживания и увеличивать межсервисный интервал; строить территориально и ситуационно-ориентированную логистику эксплуатации региональной сети метеорологических станций.

Ключевые слова: геомоделирование, предиктивная аналитика, геоситуационная интеграция, региональная метеорологическая сеть, геоависимая логистика технического обслуживания.

Для цитирования: Беляев А. К., Биденко С. И. Территориальные мониторинги гидрометеорологической и экологической обстановки: ситуационно-предиктивная поддержка технических средств наблюдения за воздушной средой // Гидрометеорология и экология. 2026. № 83. С. 340—357. doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-340-357.

GEOINFORMATICS

Original article

Territorial Monitoring of Hydrometeorological and Environmental Conditions in the Air Environment: A Predictive Approach to Supporting Observation Systems

Alexander K. Belyaev, Sergey I. Bidenko

JSC «SPA «Impulse», St. Petersburg, Russia, alexbel3101@gmail.com

Summary. A geoinformation methodology has been developed for territorial-predictive assessment and forecasting of the technical condition of observation and measurement stations used in territorially

© Беляев А. К., Биденко С. И., 2026

distributed air-environment monitoring networks. The methodology integrates geospatial environmental analysis with predictive analytics of the technical condition of automatic weather stations equipment. This makes it possible to promptly identify, localize, forecast equipment malfunctions and failures while accounting for destructive factors of the external and internal situation; reduce maintenance time and increase the service interval; develop territorially and situation-oriented logistics for technical operation of a regional meteorological station network.

Keywords: geomodeling, predictive analytics, geosituational integration, regional meteorological network, geo-dependent maintenance logistics.

For citation: Belyaev A. K., Bidenko S. I. Territorial Monitoring of Hydrometeorological and Environmental Conditions in the Air Environment: A Predictive Approach to Supporting Observation Systems. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(83):(340—357). doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-340-357. (In Russ.).

Введение

Территориальные мониторинги широко используются в последние десятилетия для сбора, обработки и освещения гидрометеорологической (ГМ-), экологической и другой геоситуационной информации.

Гидрометеорологические (ГМ-) факторы окружающей среды являются важными акторами в системе обеспечения экологического благополучия региона (территории) [1, 2]. ГМ-факторы постоянно используются в промышленности, транспорте, природопользовании, рекреационных системах. Знание параметров ГМ- и экологической ситуации обеспечивает качество хозяйственной и социальной деятельности в регионе [3].

Для обеспечения потребителей пространственной ГМ-информацией в системах территориального мониторинга широко используются различные автоматические и автоматизированные средства наблюдения за параметрами гидрометеорологической среды (рис. 1). Современная наземная наблюдательная сеть

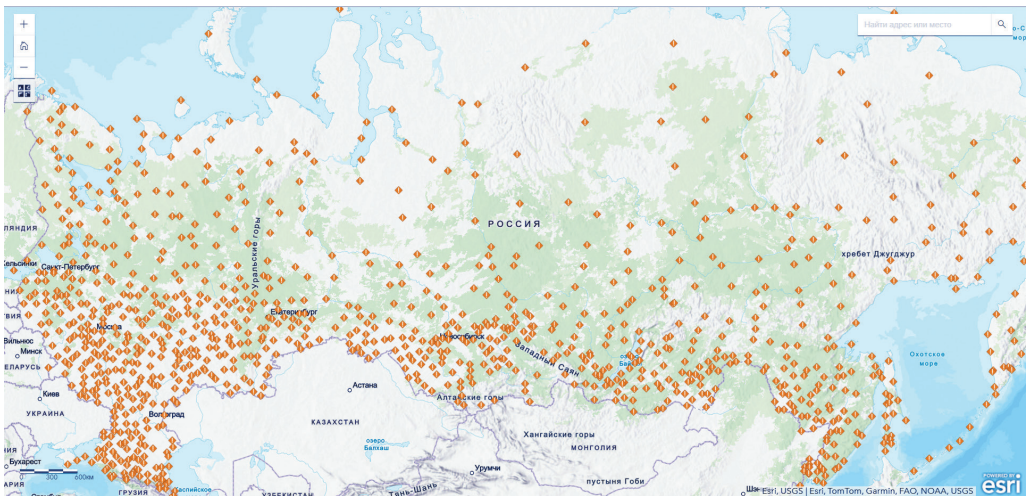


Рис. 1. Пространственное распределение метеорологических станций Росгидромета на территории Российской Федерации [8].

Fig. 1. Spatial distribution of Roshydromet meteorological stations across the Russian Federation [8].

Росгидромета [4, 5] и ведомственных/отраслевых систем [6] опирается на широкое применение автоматических метеорологических станций (АМС) и автоматизированных метеорологических комплексов (АМК) [7]. Наряду с полнофункциональными станциями и комплексами в составе территориально распределенных контуров наблюдений применяются отдельные геосенсоры и специализированные датчики, формирующие локальные потоки измерений и дополняющие стационарные наблюдения на конкретных площадках.

Эффективность применения отдельных элементов наблюдения существенно возрастает при их группировке или использовании в составе локальных и региональных сетей, что применяется в Росгидромете (рис. 2) и других ведомствах [5].

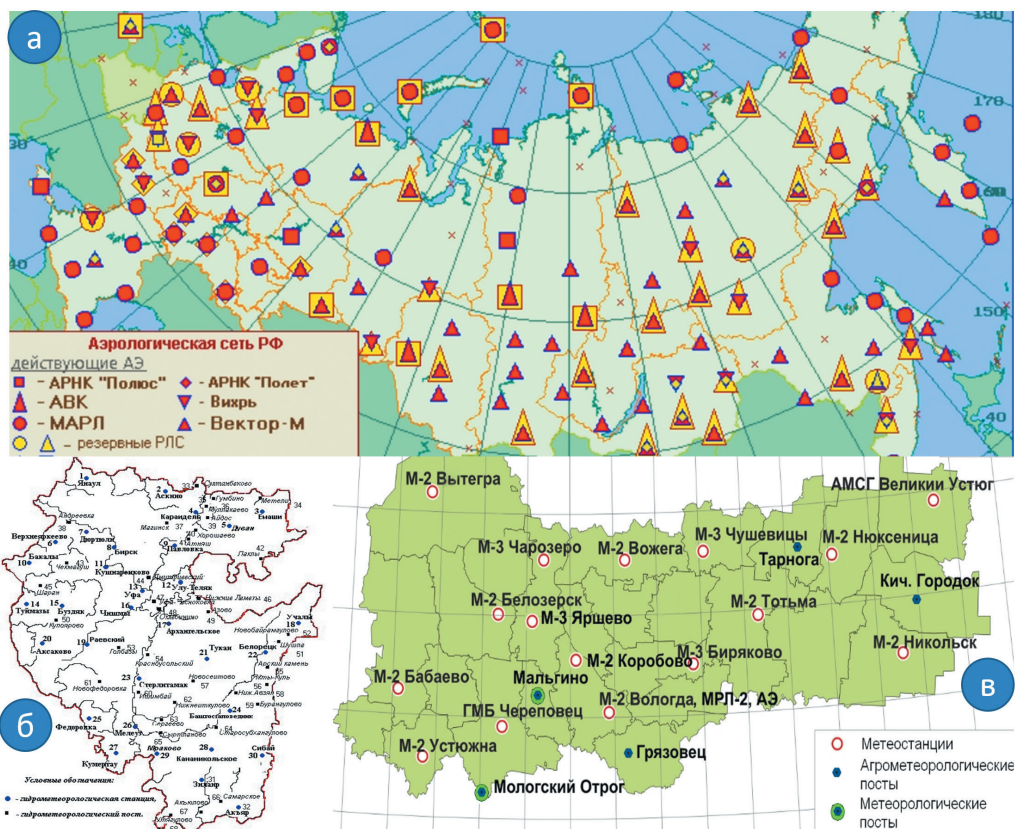


Рис. 2. Примеры пространственной организации АМС и постов наблюдения:

а) аэрологическая сеть РФ [9]; б) региональная метеорологическая сеть Республики Башкортостан [10]; в) региональная метеорологическая сеть Вологодской области [11].

Fig. 2. Examples of the spatial organization of meteorological observation networks: а) the upper-air network of the Russian Federation [9]; б) the regional meteorological network of the Republic of Bashkortostan [10]; в) the regional meteorological network of Vologda Oblast [11].

При этом результат работы таких станций представляет собой совокупность синхронизированных временных рядов метеорологических величин с разными значениями дискретности. Это обуславливает критичность непрерывности регистрации и устойчивости каналов измерения/передачи для качества оперативной и режимной информации.

Опыт эксплуатации распределенных сетей АМС/АМК показывает наличие ряда специфических трудностей в вопросах их применения [12]. Однотипные станции, размещенные в разных географических, техногенных и логистических условиях, могут характеризоваться неодинаковой частотой сбоев и особенностями в техническом обслуживании и ремонте (ТОиР) [13]. Это возникает вследствие различий в условиях размещения, воздействиях геосреды (температура, влажность, давление, осадки, радиационный фон, освещенность, ветер, доступность) и инфраструктурных ограничениях обслуживания. Для станций специального назначения (аэродромные, дорожные, судовые, экологические и др.) спектр эксплуатационных воздействий шире за счет требований отраслевых технологий и режимов работы, что повышает вариативность отказов и риск потери данных. Эффективность сетей АМС/АМК также во многом определяется вопросами оптимальной эксплуатации отдельных технических средств.

Традиционная схема эксплуатации АМС/АМК зачастую ориентирована на плановое обслуживание, локальную диагностику неисправностей и восстановление работоспособности после выявленного сбоя [14, 15]. Такой подход не позволяет учитывать пространственно-временную неоднородность условий эксплуатации, прогнозировать изменение технического состояния станций/их подсистем на заданном горизонте и выделять участки инфраструктуры с повышенным риском ухудшения работоспособности. Вместе с этим динамика состояния таких средств носит стохастический характер, поскольку определяется совокупностью случайных внутренних и внешних воздействий, включая деградацию элементов, режимы контроля, климатические и эксплуатационные факторы [16, 17].

Цель статьи состоит в обосновании геоинформационной методики территориально-предиктивной оценки технического состояния АМС/АМК, объединяющей пространственное описание размещения объектов, их атрибутивные характеристики (датчики, контроллеры, каналы связи, питание), эксплуатационные данные (сбои, замены, обслуживание) и факторные признаки среды в единой схеме предиктивной оценки готовности [18]. В качестве стохастического ядра применяется аппарат непрерывных цепей Маркова, позволяющий описывать переходы между дискретными техническими состояниями и рассчитывать вероятности пребывания объекта в каждом из них. Данный подход показал свою эффективность в различных отраслях, связанных с моделированием процесса эксплуатации технических систем [19, 20]. При этом для адаптивной параметризации геозависимых интенсивностей отказов используются методы машинного обучения [21] по данным эксплуатации и параметрам факторов окружающей среды, обеспечивающие учёт нелинейных зависимостей деградации оборудования [13, 22].

Формализация геомодели сети АМС/АМК

В работе предложена геомодель обстановки территориально-распределённой сети автоматизированных/автоматических метеорологических станций (комплексов) общего и специального назначения, объединяющая пространственное размещение объектов, их атрибутивно-содержательные характеристики, условия эксплуатации и прогнозные оценки состояния. Геомодель можно представить в виде:

$$GM = \langle GO, Rel, Loc, Atr \rangle, \quad (1)$$

где GO — множество геообъектов сети АМС/АМК, Rel — множество отношений между ними, Loc — пространство размещения объектов, Atr — пространство содержательных признаков.

Каждый геообъект (АМС/АМК или ее ключевая подсистема) $Gobj_i \in GO$, $i = \overline{1, n}$ задаётся парой пространственной и атрибутивно-содержательной компонентов:

$$Gobj_i = (Sp_i, At_i), \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где Sp_i — характеризует пространственное положение и конфигурацию объекта, а At_i — его технические, ресурсные, эксплуатационные и текущие признаки, влияющие на состояние, n — количество объектов наблюдения.

Такое представление позволяет рассматривать готовность распределенной наблюдательной сети не изолированно по отдельным станциям, а с учетом их территориального расположения, условиями функционирования и историей эксплуатации. Изменение технического состояния станции трактуется как результат совместного воздействия внутренних процессов деградации измерительных и передающих каналов и внешних факторов среды и эксплуатации.

Для количественного учёта влияния территориальных условий на вероятность отказа вводится геозависимая функция интенсивности отказов:

$$\lambda_i(t) = \lambda_i^0 \varphi_i(G_i(t)), \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где λ_i^0 — базовая интенсивность отказов при номинальных условиях эксплуатации, $G_i(t)$ — совокупность факторов среды и эксплуатации для объекта $Gobj_i$, φ_i — корректирующая функция, учитывающая влияние этих факторов на интенсивность отказов.

Такое представление связывает геомодель размещения и состояния станции с ее предиктивным аппаратом. В зависимости от объёма и структуры данных функция φ_i может быть задана аналитически, статистически или с использованием методов машинного обучения. В последнем случае обучаемый компонент позволяет учитывать нелинейные и скрытые зависимости между условиями эксплуатации и вероятностью деградации объекта.

Требуется на основе геомодели GM , эксплуатационных данных и геозависимой функции интенсивности отказов построить подход, обеспечивающий оценку

изменения технического состояния АМК/АМС на заданном горизонте прогнозирования, ранжирование станций по степени риска выхода из работоспособного состояния и формирование приоритетного перечня объектов, территориальных сегментов для первоочередного контроля и технического обслуживания.

Задача сводится к схеме предиктивной оценки готовности наблюдательной сети, в которой пространственные характеристики, содержательные признаки и факторные воздействия используются как единая основа для расчёта вероятностей технических состояний и территориально ориентированного приоритизирования контроля.

Для описания динамики технического состояния АМС/АМК использован формализм непрерывных цепей Маркова с конечным числом состояний [19]. Альтернативные подходы в виде регрессионных моделей надёжности, сетевых моделей Петри, имитационного моделирования также применимы для анализа сложных систем. Однако регрессионные модели описывают систему усреднённо и не позволяют отслеживать динамику переходов между конкретными техническими состояниями, что критично для оценки эксплуатационной готовности. Сетевые модели Петри и имитационные схемы Монте-Карло обеспечивают высокую гибкость, но их использование в задачах анализа территориально-распределённых систем сопряжено с высокой сложностью построения и трудностями интеграции с пространственными моделями технического состояния, где требуется многократное обновление параметров по сегментам и временным срезам.

Аппарат цепей Маркова подходит для моделирования эксплуатации АМС/АМК, поскольку динамика технического состояния оборудования станции обладает свойствами Марковского процесса:

- конечное число чётко определённых дискретных состояний («работоспособен», «обслуживание», «скрытый отказ» и др.);
- случайный характер переходов между состояниями с интенсивностями, зависящими от факторов среды и режимов эксплуатации;
- вероятность перехода определяется текущим состоянием.

Выбранный подход позволяет формировать матрицу интенсивностей переходов, адаптированную к условиям конкретных участков, на основе данных эксплуатации и данных о геосреде. Это позволяет рассчитывать вероятности нахождения оборудования в различных состояниях на заданном временном горизонте. Определен перечень природных, техногенных, антропогенных и эксплуатационных факторов, которые формируют территориально-обусловленные угрозы деградации и отказов средств мониторинга.

Воздействия описываются через совокупность признаков $G_i(t)$, определяющих состояние и характеристики станции:

$$G_i(t) = \{T_i, W_i, H_i, P_i, E_i, V_i, D_i\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где T_i — температура в зоне размещения объекта, W_i — скорость ветра, H_i — уровень влажности, P_i — давление, E_i — уровень электромагнитных помех, V_i — вибрационные нагрузки, D_i — динамические эксплуатационные воздействия (ремонт, обслуживание, сбой).

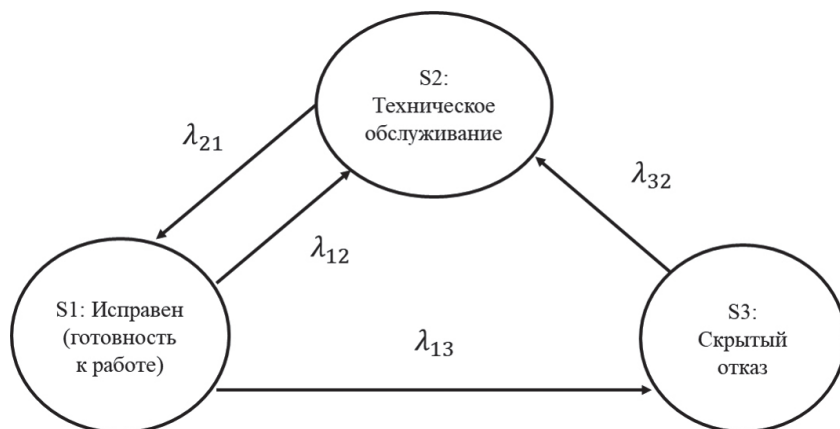


Рис. 3. Графовое представление технических состояний системы АМС/АМК:
 S1 — работоспособное состояние; S2 — выявленный отказ, обслуживание; S3 — скрытый отказ;
 λ_{13} — гео-зависимая интенсивность отказов; λ_{12} , λ_{32} — интенсивность диагностирования;
 λ_{21} — интенсивность восстановления.

Fig. 3. State transition graph of an automatic meteorological station/automated meteorological complex:

S1 — operable state; S2 — detected failure, maintenance; S3 — latent failure;
 λ_{13} — geo-dependent failure rate; λ_{12} , λ_{32} — diagnostic rate; λ_{21} — recovery rate.

При осуществлении пространственной дискретизации обслуживаемая территория Ω разбивается на ячейки $\omega_i, i = \overline{1, m}$, каждая из которых соответствует отдельному сегменту наблюдательной сети (по условиям среды и доступности).

Далее представлена модель непрерывно контролируемой в процессе эксплуатации АМС с периодическим техническим обслуживанием. Введены обозначения: 1 — работоспособное состояние (готовность к работе), 2 — техническое обслуживание, 3 — скрытый отказ (до проведения технического обслуживания). Граф состояний системы представлен на рис. 3.

Единственное работоспособное состояние технического объекта — состояние готовности к работе 1, в связи с чем основной показатель надежности — вероятность данного состояния P_1 . При анализе технического риска основной параметр — вероятность отказа $Q = P_3$. Параметры $t_{\text{ТО}}$, λ_{32} , $\tau_{\text{ТО}}$, λ_{12} , λ_{13} , λ_{21} могут быть определены по результатам испытаний либо задаваться регламентом технического обслуживания, в связи с чем при построении модели считаем их известными. Переход 3→2 отражает обнаружение скрытого отказа при очередном ТО, поэтому в базовой постановке λ_{32} принимается равной интенсивности начала ТО λ_{12} . Эволюция вероятностей нахождения системы в одном из состояний описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова (5), что обеспечивает возможность оперативного пересчёта надёжных характеристик при изменении условий и формирует основу для динамического прогноза технического состояния:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -\left(\lambda_i(t) + \frac{1}{t_{\text{ТО}}}\right)P_1(t) + \frac{1}{\tau_{\text{ТО}}}P_2(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \frac{1}{t_{\text{ТО}}}P_1(t) - \frac{1}{\tau_{\text{ТО}}}P_2(t) + \frac{1 + \lambda_i(t)t_{\text{ТО}}}{\lambda_i(t)t_{\text{ТО}}^2}P_3(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_i(t)P_1(t) - \frac{1 + \lambda_i(t)t_{\text{ТО}}}{\lambda_i(t)t_{\text{ТО}}^2}P_3(t). \end{cases} \quad (5)$$

Нормирующее условие:

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1. \quad (6)$$

Начальные условия:

$$P_1(0) = 1, P_2(0) = P_3(0) = 0. \quad (7)$$

Полагая, что при построении оптимальной стратегии управления надёжностью и программой ТОиР станции АМК/АМС (пункта наблюдений) периодичность технического обслуживания $\tau_{\text{ТО}}$, выбранная в качестве управляющего параметра, может изменяться во времени, введены следующие обозначения:

$$x_1(t) = P_1(t), \quad x_2(t) = P_2(t), \quad x_3(t) = 1 - x_1(t) - x_2(t),$$

$$u(t) = \frac{1}{t_{\text{ТО}}}, \quad \mu = \frac{1}{\tau_{\text{ТО}}}, \quad t \in [0, T]. \quad (8)$$

С учетом введенных обозначений сформулирована к задаче оптимального управления, где целью решения задачи является минимизация вероятности нахождения станции АМК/АМС в неработоспособном состоянии во временном промежутке от 0 до T . Требуется минимизировать функционал:

$$I(u) = \int_0^T e^{-\delta t} [1 - x_1(t) - x_2(t)] dt, \quad (9)$$

при динамических ограничениях:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -(\lambda_i(t) + u(t))x_1(t) + \mu x_2(t), \quad t \in [0, T], \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{1}{\lambda_i(t)}u^2(t)x_1(t) - \left(\mu + u(t) + \frac{1}{\lambda_i(t)}u^2(t)\right)x_2(t) + \\ &\quad + \left(\frac{1}{\lambda_i(t)}u(t) + 1\right)u(t), \quad t \in [0, T], \end{aligned} \quad (10)$$

с начальными условиями:

$$x_1(0) = X_1^0, \quad x_2(0) = X_2^0, \quad u(0) = Y^0, \quad (11)$$

при ограничении на управление:

$$Y_{\min} \leq u(t) \leq Y_{\max}, t \in [0, T]. \quad (12)$$

Сложность аналитического моделирования надёжности станций АМК/АМС обусловлена стохастическим характером внешних факторов (метеонагрузка, режимы эксплуатации, качество энергоснабжения и устойчивость каналов связи), влияющих на работоспособность и не учитываемых в базовых моделях.

Наряду с техническими параметрами функционирования оборудования необходимо учитывать влияние многочисленных факторов геосреды (температура, ветер, осадки, излучение и др.). Для их учёта используется аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС), как дополнительное управляющее воздействие в правой части динамических уравнений (5). Это позволяет получить значения геозависимой интенсивности отказов $\lambda_i(t)$, определяющей переход из работоспособного состояния в состояние отказа в ячейке ω_j .

Выделены основные группы факторов, оказывающих наибольшее влияние на состояние станций:

— климатические (температура, влажность, осадки, ветер, обледенение, перепады температур, циклы перехода через 0);

— техногенные и внешние воздействия (вибрации и ударные нагрузки для дорожных/судовых/передвижных станций, загрязнение, запылённость, электромагнитные помехи, аварии);

— антропогенные и организационные (ошибки персонала, несанкционированный доступ, нарушения регламентов, вандализм);

— инфраструктурно-эксплуатационные (качество электроснабжения и автономного питания, устойчивость каналов связи, удаленность и доступность обслуживания).

Агрегированные нормированные признаки формируются по совокупности факторов $G_i(t)$:

$$x_j^{(G)}(t) = \varphi_j(G_i(t)), j = 1, 2, i = \overline{1, n}, \quad (13)$$

где φ_j — функция нормализации/агрегации (например, факторные компоненты либо две интегральные группы факторов).

ИНС-аппроксимация $\lambda_i(t)$ задаётся выражениями:

$$g_1(t) = G_1 \left(\sum_{j=1}^2 \omega_{1j}(t) x_j^{(G)}(t) - \Psi_1 \right), \quad (14)$$

$$g_2(t) = G_2 \left(\sum_{j=1}^2 \omega_{2j}(t) x_j^{(G)}(t) - \Psi_2 \right), \quad (15)$$

$$\lambda_i(\tau) = G_0 (\omega_{01}(t) g_1(t) + \omega_{02}(t) g_2(t) - \Psi_0), \lambda_i(t) \geq 0, i = \overline{1, n}, \quad (16)$$

где $\omega_{ij}(t)$ — весовые коэффициенты ИНС, Ψ_0, Ψ_1, Ψ_2 — параметры сдвига, $t \in [0, T]$, функция G_0 выбирается так, чтобы обеспечить неотрицательность интенсивности, например, экспоненциальной.

Оценка $\lambda_i(t)$, полученная по приведённой нейросетевой схеме, используется в формальной системе (5) и в динамических ограничениях задачи оптимального управления (6), (7), (12).

Для решения данной задачи может быть применена ее дискретная аппроксимация с использованием явных разностных схем, введены сопряженные переменные и построены приближенные траектории [15]. В результате дискретной аппроксимации из условий стационарности функции Лагранжа в дискретной задаче оптимального управления с применением метода проекции градиента может быть построено приближённое решение задачи управления надёжностью станции/сегмента сети АМК/АМС.

Геоинформационная методика представления и оценки состояния сети АМС/АМК

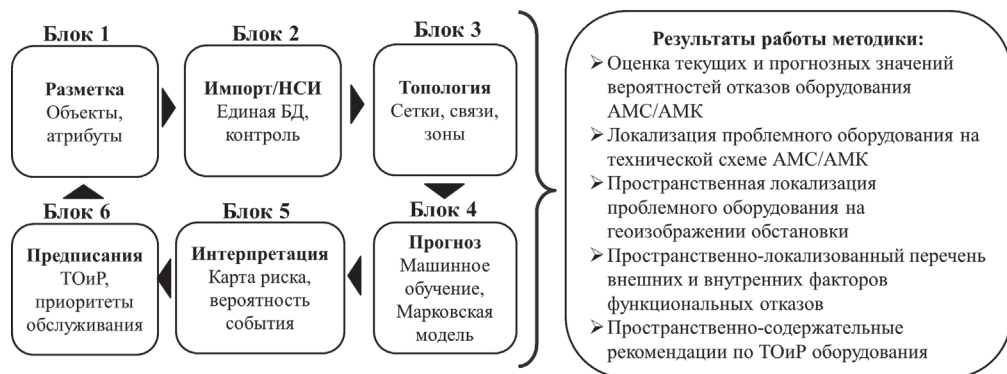
Переход от формализованной модели технических состояний к прикладной процедуре оценки требует объединения пространственных данных о размещении пунктов наблюдений, эксплуатационно-событийной информации, факторных характеристик территории и расчетных модулей прогноза в едином контуре анализа. В связи с этим предложена методика, обеспечивающая не только расчет вероятностей неблагоприятных состояний для отдельных АМС/АМК, но и последующее территориальное представление результатов в форме зон приоритетного контроля и обслуживания.

Геоинформационная методика территориальнопредиктивной оценки технического состояния сети АМС/АМК основана на геомодели состояния и реализуется в виде многоуровневой блочной структуры. Ключевыми компонентами методики являются:

- (1) геомодель системы АМС/АМК и её подсистем;
- (2) территориальная декомпозиция (деление на ячейки) и пространственные отношения;
- (3) параметризация технического состояния на основе данных эксплуатации, самодиагностики и контроля качества временных рядов;
- (4) учёт факторов геосреды и инфраструктурной доступности;
- (5) прогнозирование риска неблагоприятного состояния на основе Марковской модели с модулем уточнения параметров методами машинного обучения;
- (6) ситуационная интерпретация прогноза и формирование пространственно-привязанных предписаний по контролю данных и ТОиР;
- (7) обратная связь и адаптация моделей.

Состав и структура обобщенной геоинформационной методики оценки состояния сети АМС/АМК представлены на рис. 4.

Выходными результатами методики являются: прогнозная вероятность неблагоприятного состояния по станции, ранжированный перечень объектов контроля, визуализация приоритетных зон технического обслуживания и перечень пространственно-содержательных рекомендаций по поддержанию функциональной и пространственно-структурной целостности.



Обратная связь (блок 6 – блок 1): циклический переход с учетом реализованных ситуационно-предиктивных императивов

Рис. 4. Структура обобщённой методики территориальнопредиктивной оценки состояния технических средств сети АМС/АМК:

ТОиР — техническое обслуживание и ремонт; НСИ — нормативно-справочная информация.

Fig. 4. Structure of the geoinformation methodology for territorially predictive assessment of the state of an AMS/AMC network:

TMaR — technical maintenance and repair; NRI — normative reference information, (MD — master data).

Программная реализация геоинформационной методики включает:

— клиентскую часть — вебинтерфейс (Razor Pages) с интерактивной картой OpenStreetMap/Leaflet, реестрами объектов и эксплуатационных событий, реестрами нормативно-справочной информации (НСИ);

— серверную часть — ASP.NET Core (MVC), сервисы ведения геомодели, расчёта оценок, импорта/экспорта данных из реестров, подготовки рекомендаций;

— хранилище — PostgreSQL с расширением PostGIS для пространственных и эксплуатационных данных.

Предиктивный аппарат вынесен во внешний Python-контур (реализация гибридной Марковской модели) с обменом через RESTAPI с основным ПО. Картографические слои и территориальная сетка покрытия подготавливаются в ГИС-платформе (QGIS/ArcGIS) и импортируются в формате GeoJSON. Логическая модель данных включает следующие сущности: Station (станции, пункты наблюдения), StationEvent (события), Zone/Grid (ячейки), FactorLayer (геофакторы), StateHistory (история состояний), Forecast (прогноз), Recommendation/WorkOrder (рекомендации и задания), что обеспечивает накопление истории и воспроизводимость геоконтроллинга процесса технической эксплуатации сети АМС/АМК.

Для преодоления ограничений метода предиктивной аналитики предложена интеграция с аппаратом геоинформатики и геопространственного анализа [16, 18]. Суть новой ситуационно-предиктивной методики состоит в том, что при оценке и прогнозировании технического состояния приборов и оборудования

наряду со статистическими данными по функционированию технических средств учитывается: прямое и прогнозируемое воздействие на них деструктивных факторов природной, техногенной и социальной геосреды; факторы геоситуации для организации процедур ремонта и технического обслуживания. При этом данные из внешних источников наполняют геомодель представления обстановки в сети АМС/АМК в части описания параметрических особенностей функционирования АМС/АМК. С использованием установленных значений параметров геоинформационной модели и аналитических зависимостей на основе Марковского аппарата рассчитываются прогнозные значения вероятности нахождения отдельных геообъектов в состояниях работоспособности, обслуживания и отказа. При этом выполняется расчет значений геоинформационной интенсивности отказов с использованием методов машинного обучения для обработки векторов параметров из состава геомодели. Полученные объектные оценки агрегируются по ячейкам покрытия и переводятся в пространственное представление зон приоритетного контроля и обслуживания с окрашиванием в зависимости от прогнозного состояния станций.

Схема, представленная на рис. 5, отражает переход от исходных пространственных, эксплуатационных и факторных данных к двум взаимосвязанным уровням результата: объектному и территориальному. На объектном уровне формируется оценка текущего и прогнозируемого технического состояния отдельных станций. На территориальном уровне осуществляется агрегация этих оценок по ячейкам покрытия и выделяются участки повышенного риска. Такое представление позволяет использовать единый массив данных как для технической интерпретации состояния отдельных АМС/АМК, так и для пространственного планирования контрольных и обслуживающих мероприятий.

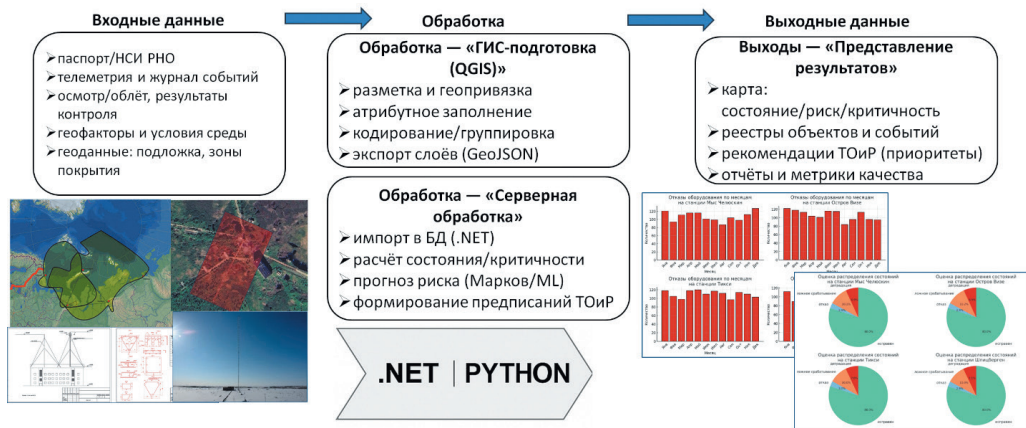


Рис. 5. Схема геоинформационного представления и оценки технического состояния и риска отказа объектов АМС/АМК.

Fig. 5. Geoinformation scheme for representing and assessing the technical state of an AMS/AMC network.

Верификация разработанной методики выполнена на территориальной схеме сети наземных автоматизированных метеорологических станций. В объектный состав включены 45 средств наблюдения, в том числе 12 метеостанций общего назначения, 3 авиационные метеостанции, 12 дорожных метеостанций.

На рис. 6 приведены результаты базового варианта предиктивной методики, реализованного как ранжирование станций АМС/АМК по прогнозируемому риску неблагоприятного состояния на фиксированный момент времени t_0 . Продемонстрировано формирование приоритетного перечня контроля станций при сопоставимых параметрах прогноза и ресурсных ограничениях на объём первоочередных проверок. Полученные объектные ранжирования используются как исходные данные при переходе к предиктивно-геоинформационным процедурам, при реализации которых дополнительно формируется территориальное поле риска и адресные рекомендации по ячейкам покрытия.

В таблице ранжирования станции упорядочены по убыванию прогнозного значения вероятности нахождения в состоянии отказа; цветовая индикация отражает уровень приоритета контроля; числовое значение в строке соответствует расчетной прогнозной оценке риска на фиксированный горизонт.

Объектное ранжирование не позволяет в полной мере учитывать пространственную концентрацию рисков и различия в условиях обслуживания соседних участков наблюдательной сети. Необходим переход к территориально-интерпретируемой постановке, в которой оценки по отдельным станциям сопоставляются с ячейками покрытия, а результаты представляются в форме зон приоритетного контроля. Такой переход позволяет объединить прогноз по объектам с географическим контекстом эксплуатации и подготовить основу для планирования профилактических работ по сегментам территории.

Объект	Зона	Последнее событие	Risk, %	Класс
Метеостанция	MS-6	02.03.2026 Дрейф датч Т	80,9	F
Метеостанция	MS-5	01.03.2026 Дрейф датч Т	55,4	M
Метеостанция	MS-17	02.03.2026 Дрейф датч Т	52,3	M
Метеостанция	MS-8	01.03.2026 без отклонений	32,3	S
Метеостанция	MS-14	02.03.2026 без отклонений	31,3	S
Метеостанция	MS-10	01.03.2026 без отклонений	28,9	S

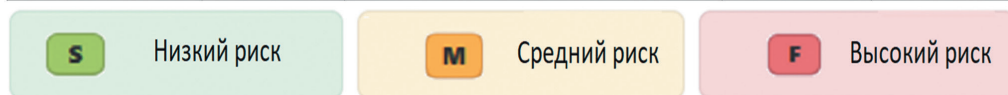


Рис. 6. Пример объектного ранжирования станций АМС/АМК по прогнозному риску неблагоприятного состояния.

Fig. 6. Example of station-level ranking of AMS/AMC units by the predicted risk of adverse state.

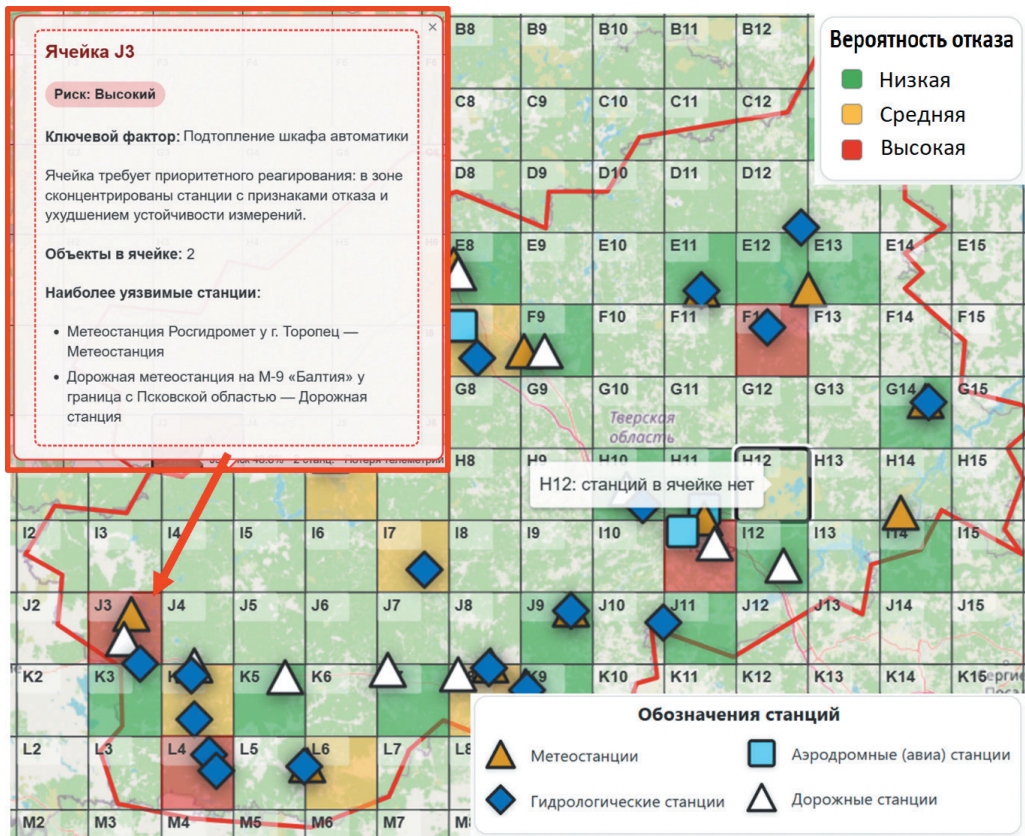


Рис. 7. Пример размещения станций АМС/АМК и сетки территориального анализа.

Fig. 7. Example of AMS/AMC placement and territorial analysis grid.

Для наглядного представления исходной задачи приведена экранная форма, полученная с помощью разработанного программного комплекса. На рис. 7 показано размещение станций АМС/АМК на обслуживаемой территории и сформированная сетка территориального покрытия, используемая для пространственной привязки событий эксплуатации и контроля качества, расчёта геофакторов и последующей агрегации прогнозных оценок с окрашиванием в зависимости от состояния АМС/АМК.

Точечные символы разной формы соответствуют станциям АМС/АМК, на геоизображение нанесена полигональная сетка для разбиения на ячейки, которые использованы для агрегации объектных оценок и перехода к территориально интерпретируемой схеме планирования работ по ТОиР.

Установлено, что учет геофакторов территории и пространственной локализации объектов повышает качество прогноза состояния по сравнению с традиционными предиктивными методами без учета геосреды. Сравнение осуществлялось

по интегральному показателю качества выявления объектов с неблагоприятным прогнозируемым состоянием. При расчете учитываются как пропуски реальных неблагоприятных состояний, так и ложные срабатывания прогноза. На горизонте прогнозирования 7 сут. применение геоинформационной методики позволило увеличить значение указанного показателя с 73% до 86%. Дополнительный эффект методики заключается в переходе от объектного ранжирования к пространственно привязанному выделению зон первоочередного контроля и ТО.

Заключение

1. Региональная сеть АМС/АМК характеризуется большим территориальным охватом и сложным содержательным функционированием, ее географически разнесенные сенсоры и другое техническое оборудование испытывают различные воздействия окружающей среды, что требует применения специальных геоинформационных методов пространственного анализа обстановки во всем регионе.

2. Анализ и прогнозирование состояния технических средств АМС/АМК традиционно осуществляется с помощью аппарата предиктивной аналитики, который анализирует только статистические данные отказов оборудования в отдельной локации и не позволяет учитывать деструктивное воздействие факторов геосреды на оборудование региональной сети АМС/АМК в целом.

3. Разработанная геоинформационная методика территориально-предиктивной оценки технического состояния сети АМС/АМК общего и специального назначения ориентирована на сети автоматических метеорологических станций, автоматизированных метеорологических комплексов и иных пространственно распределённых средств наблюдения, функционирующих в условиях неоднородности природных, техногенных и эксплуатационных факторов.

4. Методика объединяет аппарат геоинформатики с методами и процедурами предиктивной аналитики, что позволяет оперативно диагностировать и прогнозировать состояние технических средств и строить пространственно-локализованные рекомендации по ТОиР.

5. Использование в методике аппарата непрерывных цепей Маркова с введенным состоянием скрытого отказа позволило учитывать стохастический характер динамики изменения состояний технических средств АМС/АМК.

6. Применение адаптивного механизма расчета геозависимых интенсивностей отказов в цепях Маркова, а также использование аппарата искусственных нейронных сетей позволяет учитывать значительные объемы динамических пространственных и содержательных данных обстановки при моделировании обобщенной технической готовности региональной сети АМС/АМК.

7. Апробация и верификация на территориальной схеме сети метеорологических станций демонстрируют, что методика обеспечивает объединение объектного и территориального уровней анализа: от оценивания риска по отдельным станциям до выделения приоритетных зон эксплуатационного контроля. Полученные результаты могут быть использованы при модернизации наземных наблюдательных сетей, планировании работ по техническому обслуживанию и ремонту.

Список литературы

1. Биненко В. И., Ткаченко А. А. Влияние техногенно-экологических происшествий на загрязнение атмосферного воздуха и здоровье людей // Гидрометеорология и экология. 2020. № 58. С. 83—93. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-83-93.
2. Минашкина А. В., Кондратенко С. В., Воробьева Е. А. Разработка программы мониторинга водных объектов вблизи рекультивированного полигона ТКО в пос. им. А. Космодемьянского Калининградской области // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 96—112. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-96-112.
3. Красногорская Н. Н., Белозерова Е. А. Разработка геоинформационной системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами // Гидрометеорология и экология. 2021. № 65. С. 702—726. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-702-725.
4. Грызунов В. В., Нестерова А. О. Структура живучей сети метеоконплексов транспортно-логистических систем «Индустрии 4.0» // Гидрометеорология и экология. 2020. № 59. С. 111—123. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-111-123.
5. Гаврилова С. Ю., Иванова Т. А., Луцко Л. В., Ерохина А. Е. О состоянии и функционировании автоматизированных наблюдательных сетей Росгидромета // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2018. Вып. 588. С. 86—109.
6. Метеорологические измерения на аэродромах. СПб.: Гидрометеоиздат, 2008. 427 с.
7. Восканян К. Л., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С. Автоматические метеорологические станции. Часть 1. Тактико-технические характеристики. СПб.: РГГМУ, 2016. 170 с.
8. Экстремальные погодно-климатические явления. Веб-ГИС для визуализации и анализа погодно-климатических явлений в России. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://extremeclimate.ru/monitoring/meteo/> (дата обращения: 18.02.2026).
9. Состав аэрологической сети Российской Федерации. Отдел оперативного мониторинга НТЦР ЦАО. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://cao-ntcr.mipt.ru/monitor/2026/1/net2026-1.htm> (дата обращения: 18.02.2026).
10. Наблюдательная метеорологическая сеть станций Вологодской области. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://vegms.ru/nasha-zhizn/> (дата обращения: 18.02.2026).
11. Сеть метеорологических станций и постов. Башкирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.meteorb.ru/meteorology/network-of-meteorological-stations> (дата обращения: 18.02.2026).
12. Ouyang H., Qin Z., Xu X. et al. Autonomous Quality Control of High Spatiotemporal Resolution Automatic Weather Station Precipitation Data // Remote Sensing. 2025. Vol. 17, No. 3. Art. 404. doi: 10.3390/rs17030404.
13. Hadjidemetriou G. M., Herrera M., Parlikad A. K. Condition and criticality-based predictive maintenance prioritization for networks of bridges // Structure and Infrastructure Engineering. 2022. Vol. 18, No. 8. P. 1207—1221. doi: 10.1080/15732479.2021.1897146.
14. Идрисов И. В., Наумов А. В., Ковчин И. С. Опыт создания и применения автоматических метеорологических станций в полярных регионах // Российская Арктика. 2023. Т. 5, № 2. С. 44—53. doi: 10.24412/2658-4255-2023-2-44-53.
15. Викторова В. С., Степанянц А. С. Модели и методы расчета надежности технических систем. 2-е изд., испр. М.: URSS: ЛЕНАНД, 2016. 256 с.
16. Parra L. Remote Sensing and GIS in Environmental Monitoring // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 16. Art. 8045. doi: 10.3390/app12168045.
17. Ao S.-I., Gelman L., Karimi H. R., Tiboni M. Advances in Machine Learning for Sensing and Condition Monitoring // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 23. Art. 12392. doi: 10.3390/app122312392.
18. Аликулов А. Б., Эшмурадов Д. Э. Анализ мониторинга состояния природной среды с применением ГИС-технологий // Теория и практика современной науки. 2023. № 1 (91). С. 240—247. doi: 10.46566/2412-9682_2022_91_240.
19. Zarei M., Bagheri M., Dehghanian P. Markov-chain-driven Optimization of Inspection-Based Maintenance, Part I: Models and Methods // Electric Power Systems Research. 2024. Vol. 228. Art. 110049. doi: 10.1016/j.epsr.2023.110049.

20. Tamaloussi N., Bouzaouit A. Study of Reliability in a Repairable System by Markov Chains // *Acta Universitatis Sapientiae, Electrical and Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 12. P. 66—76. doi: 10.2478/auseme-2020-0005.
21. Carvalho T. P., Soares F. A., Vita R. et al. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance // *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 137. Art. 106024. doi: 10.1016/j.cie.2019.106024.
22. Zhang D., Ma Y., Zhang H., Zhang Y. Marine Equipment Siting Using Machine-Learning-Based Ocean Remote Sensing Data: Current Status and Future Prospects // *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 20. Art. 8889. doi: 10.3390/su16208889.

References

1. Binenko V. I., Tkachenko A. A. The impact of technogenic-ecological incidents on atmospheric air pollution and human health. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2020; (58):(83—93). doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-83-93. (In Russ.).
2. Minashkina A. V., Kondratenko S. V., Vorobyova E. A. Development of a monitoring program for water bodies near the reclaimed municipal solid waste landfill in A. Kosmodemyansky settlement, Kaliningrad region. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021; (62):(96—112). doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-96-112. (In Russ.).
3. Krasnogorskaya N. N., Belozeroва E. A. Development of a geographic information system for decision making in water resources management. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021; (65):(702—726). doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-702-725. (In Russ.).
4. Gryzunov V. V., Nesterova A. O. Structure of a resilient network of meteorological complexes for transport and logistics systems of Industry 4.0. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2020; (59):(111—123). doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-111-123. (In Russ.).
5. Gavrilova S. Yu., Ivanova T. A., Lutsko L. V., Erokhina A. E. On the state and functioning of Roshydromet automated observation networks. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voeykova = Proceedings of the Voeikov Main Geophysical Observatory*. 2018; (588):(86—109). (In Russ.).
6. *Meteorologicheskie izmereniya na aerodromakh = Meteorological measurements at aerodromes*. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat; 2008. 427 p. (In Russ.).
7. Voskanyan K. L., Kuznetsov A. D., Seroukhova O. S. *Avtomaticheskije meteorologicheskie stantsii. Chast' I. Taktiko-tekhnicheskie kharakteristiki = Automatic weather stations. Part I. Tactical and technical characteristics*. Saint Petersburg: RSHU; 2016. 170 p. (In Russ.).
8. *Ekstremal'nye pogodno-klimaticheskie yavleniya. Web-GIS dlya vizualizatsii i analiza pogodno-klimaticheskikh yavlenii v Rossii = Extreme weather and climate events. Web GIS for visualization and analysis of weather and climate events in Russia*. Available at: <http://extremeclimate.ru/monitoring/meteo/> (accessed: 18.02.2026). (In Russ.).
9. *Sostav aerologicheskoi seti Rossiiskoi Federatsii. Otdel operativnogo monitoringa NTTsR TsAO = Composition of the upper-air network of the Russian Federation. Operational Monitoring Department, Scientific and Technical Center, Central Aerological Observatory*. Available at: <http://cao-ntcr.mipt.ru/monitor/2026/1/net2026-1.htm> (accessed: 18.02.2026). (In Russ.).
10. *Nablyudatel'naya meteorologicheskaya set' stantsii Vologodskoy oblasti. = Observation network of meteorological stations of the Vologda oblast*. Available at: <https://vcgms.ru/nasha-zhizn/> (accessed: 18.02.2026). (In Russ.).
11. *Set' meteorologicheskikh stantsii i postov. Bashkirskoe upravlenie po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy = Network of meteorological stations and posts. Bashkir Directorate for Hydrometeorology and Environmental Monitoring*. Available at: <https://www.meteorb.ru/meteorology/network-of-meteorological-stations> (accessed: 18.02.2026). (In Russ.).
12. Ouyang H., Qin Z., Xu X. et al. Autonomous quality control of high spatiotemporal resolution automatic weather station precipitation data. *Remote Sensing*. 2025; 17(3):404. doi: 10.3390/rs17030404.
13. Hadjidemetriou G. M., Herrera M., Parlikad A. K. Condition and criticality-based predictive maintenance prioritisation for networks of bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2022; 18(8):(1207—1221). doi: 10.1080/15732479.2021.1897146.

14. Idrisov I. V., Naumov A. V., Kovchin I. S. Experience in creating and using automatic weather stations in polar regions. *Rossiyskaya Arktika = Russian Arctic*. 2023; 5(2):(44—53). doi: 10.24412/2658-4255-2023-2-44-53. (In Russ.).
15. Viktorova V. S., Stepanyants A. S. *Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem = Models and methods for reliability analysis of technical systems*. 2nd ed. Moscow: URSS, LENAND; 2016. 256 p. (In Russ.).
16. Parra L. Remote Sensing and GIS in Environmental Monitoring. *Applied Sciences*. 2022; 12(16):8045. doi: 10.3390/app12168045.
17. Ao S.-I., Gelman L., Karimi H. R., Tiboni M. Advances in Machine Learning for Sensing and Condition Monitoring. *Applied Sciences*. 2022; 12(23):12392. doi: 10.3390/app122312392.
18. Alikulov A. B., Eshmuradov D. E. Analysis of environmental state monitoring using GIS technologies. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki = Theory and Practice of Modern Science*. 2023; (1):(240—247). doi: 10.46566/2412-9682_2022_91_240. (In Russ.).
19. Zarei M., Bagheri M., Dehghanian P. Markov-chain-driven Optimization of Inspection-Based Maintenance, Part I: Models and Methods. *Electric Power Systems Research*. 2024; 228:110049. doi: 10.1016/j.epsr.2023.110049.
20. Tamaloussi N., Bouzaouit A. Study of Reliability in a Repairable System by Markov Chains. *Acta Universitatis Sapientiae, Electrical and Mechanical Engineering*. 2020; 12:66—76. doi: 10.2478/aus-eme-2020-0005.
21. Carvalho T. P., Soares F. A., Vita R., Francisco R. P., Basto J. P., Alcalá S. G. S. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*. 2019; 137:106024. doi: 10.1016/j.cie.2019.106024.
22. Zhang D., Ma Y., Zhang H., Zhang Y. Marine Equipment Siting Using Machine-Learning-Based Ocean Remote Sensing Data: Current Status and Future Prospects. *Sustainability*. 2024; 16(20):8889. doi: 10.3390/su16208889.

Информация об авторах

Беляев Александр Константинович, начальник отдела АО НПО «Импульс», alexbel3101@gmail.com.

Биденко Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор АО «НПО «Импульс», главный эксперт, sibidenko@mail.ru.

Information about authors

Belyaev Alexander K., Joint Stock Company «Scientific and Production Association «Impulse», Head of Department.

Bidenko Sergey I., Doctor of Technical Sciences, Professor Joint Stock Company «Scientific and Production Association «Impulse», Lead Expert.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 11.04.2026

Принята в печать 26.05.2026

The article was received on 11.04.2026

The article was accepted on 26.05.2026