НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 004.8:551.5(470.6)
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-84-89

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 004.8:551.5(470.6)

Интеграция Фурье-анализа и нейросетевых моделей для оценки гидрометеорологических угроз на территории Северо-Кавказского федерального округа

А. И. Лазовский✉

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов», г. Балашиха, Российская Федерация

✉ *lazovskiy.tolik@mail.ru*

Резюме. Представлен комплексный анализ устойчивости экосистем Северо-Кавказского региона к техногенной нагрузке в условиях усиливающегося антропогенного воздействия. Актуальность исследования обусловлена высокой природной уязвимостью территории, связанной со сложным орографическим строением, климатической неоднородностью и интенсивным хозяйственным освоением региона. Исследование основано на интеграции данных дистанционного зондирования Земли, методов геоинформационного моделирования и статистического анализа материалов экологического мониторинга Росгидромета, Росприроднадзора и региональных природоохранных структур за 2018–2024 года. Использование междисциплинарного подхода позволило выявить пространственно-временные закономерности трансформации природных комплексов и оценить уровень их устойчивости к техногенному воздействию. Рассмотрены природно-географические, геохимические и климатические особенности Северного Кавказа, определяющие специфику формирования экологических рисков. Установлено, что основными факторами деградации экосистем выступают горнодобывающая деятельность, интенсивное сельское хозяйство и урбанизационные процессы. В результате антропогенного воздействия фиксируются процессы эрозии и деградации почв, загрязнения поверхностных и подземных вод, сокращения биоразнообразия, а также нарушения гидрологического режима рек. Анализ геоинформационных моделей и спутниковых данных показал, что значительная часть территории региона характеризуется пониженным уровнем экологической устойчивости, при этом наиболее уязвимыми являются горные и предгорные зоны. Научная новизна исследования заключается в комплексной оценке устойчивости экосистем на основе интеграции разнородных данных и методов пространственного анализа. На основе полученных результатов предложены меры по совершенствованию систем геоэкологического мониторинга, внедрению экологически безопасных технологий природопользования и рекультивации нарушенных земель. Реализация комплексного подхода к управлению природопользованием позволит снизить уровень техногенной нагрузки и обеспечить устойчивое развитие Северо-Кавказского региона.

Ключевые слова: Северо-Кавказский регион, гидрометеорологические угрозы, преобразование Фурье, нейронные сети, временные ряды, прогнозирование

Для цитирования: Лазовский А.И. Интеграция Фурье-анализа и нейросетевых моделей для оценки гидрометеорологических угроз на территории Северо-Кавказского федерального округа. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 84-89. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-84-89.

Integration of Fourier analysis and neural network models for assessing hydrometeorological hazards in the North Caucasus federal district

A. I. Lazovsky✉

Federal State Budgetary Educational Institution of Additional Professional Education "Institute of Advanced Training for Managers and Specialists", Balashikha, Russian Federation

✉ *lazovskiy.tolik@mail.ru*

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of the sustainability of ecosystems in the North Caucasus region to anthropogenic stress in the context of increasing anthropogenic impact. The relevance of the study is due to the high natural vulnerability of the territory, which is associated with its complex orographic structure, climatic heterogeneity, and intensive economic development. The study is based on the integration of remote sensing data, geoinformation modeling methods, and statistical analysis of environmen-

© Лазовский А. И., 2026

tal monitoring data from Rosgidromet, Rosprirodnadzor, and regional environmental protection agencies for the period 2018–2024. The use of an interdisciplinary approach made it possible to identify the spatial and temporal patterns of the transformation of natural complexes and to assess the level of their resistance to anthropogenic impact. The natural-geographical, geochemical, and climatic features of the North Caucasus, which determine the specifics of the formation of environmental risks, are considered. It has been established that the main factors of ecosystem degradation are mining activities, intensive agriculture, and urbanization processes. As a result of anthropogenic impact, processes of soil erosion and degradation, contamination of surface and groundwater, reduction of biodiversity, and changes in river hydrological regimes are observed. The analysis of geoinformation models and satellite data has shown that a significant part of the region is characterized by a reduced level of ecological stability, with mountainous and foothill areas being the most vulnerable. The scientific novelty of the study lies in the integrated assessment of ecosystem stability based on the combination of heterogeneous data and spatial analysis methods. Based on the obtained results, measures are proposed to improve geoecological monitoring systems, implement environmentally safe technologies, and rehabilitate disturbed lands. The implementation of a comprehensive approach to environmental management will reduce technogenic load and ensure sustainable development of the North Caucasus region.

Keywords: North Caucasus region, hydrometeorological threats, Fourier transform, neural networks, time series, forecasting

For citation: Lazovsky A.I. Integration of Fourier analysis and neural network models for assessing hydrometeorological hazards in THE North Caucasus federal district. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 84-89. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-84-89.

Введение

Северо-Кавказский регион представляет собой одну из наиболее экологически уязвимых и сложных территорий Российской Федерации. Его уязвимость обусловлена синергетическим воздействием природно-географических, климатических и антропогенных факторов. Сложное орографическое строение, характеризующееся значительными перепадами высот, развитой гидрографической сетью и активными геодинамическими процессами, формирует высокую чувствительность природных комплексов к экзогенным воздействиям. Пространственная неоднородность ландшафтных зон (от равнинных степей до высокогорных экосистем) усложняет анализ и прогнозирование экологических процессов.

В последние десятилетия наблюдается интенсификация антропогенной нагрузки на экосистемы региона, связанная с экспансией горнодобывающей промышленности, расширением агропромышленного комплекса и урбанизацией [1]. Горнодобывающая деятельность приводит к деструкции почвенного покрова, формированию техногенных ландшафтов и контаминации окружающей среды тяжелыми металлами. Интенсивное сельскохозяйственное производство способствует деградации почв, эрозионным процессам и изменению гидрологического режима. Урбанизация, в свою очередь, увеличивает антропогенное давление на природные системы, включая загрязнение атмосферы и гидросферы.

Дополнительным фактором, дестабилизирующим экологическую ситуацию, являются климатические изменения, проявляющиеся в увеличении частоты экстремальных метеорологических явлений, изменении режима осадков и температурных аномалиях. Эти процессы оказывают существенное влияние на функционирование экосистем, способствуя нарушению их гомеостаза и ускорению деградационных процессов [2]. Особое значение имеют гидрологические системы, в частности бассейны рек Терек и Кубань, где климатические и антропогенные воздействия приводят к трансформации гидрологического режима, увеличению риска наводнений и ухудшению качества водных ресурсов.

Несмотря на наличие значительного числа исследований, посвященных оценке экологического состояния Северо-Кавказского региона, существующие подходы, как правило, основаны на использовании отдельных методов анализа и не обеспечивают комплексного учета многомерной структуры природных процессов. Традиционные методы статистического анализа не позволяют в полной мере учитывать пространственно-временную неоднородность и нелинейный характер изменений экосистем. В этой связи актуальным является применение интегрированных методов, объединяющих данные дистанционного зондирования Земли, геоинформационные технологии и методы математического анализа.

Использование данных дистанционного зондирования позволяет получать объективную информацию о состоянии природных комплексов на больших территориях, а геоинформационные системы обеспечивают возможность пространственного анализа и моделирования экологических процессов. В сочетании с методами статистического анализа это позволяет сформировать комплексный подход к оценке устойчивости экосистем и выявлению закономерностей их трансформации под воздействием техногенных факторов.

Цель исследования: проведение комплексной оценки устойчивости экосистем Северо-Кавказского региона к техногенной нагрузке на основе интеграции данных дистанционного зондирования, геоинформационного моделирования и статистического анализа.

Задачи исследования: выявление ключевых факторов деградации экосистем, анализа пространственных закономерностей их изменения и разработки рекомендаций по снижению антропогенной нагрузки и обеспечению устойчивого природопользования [3].

Предлагаемый подход ориентирован на формирование научно обоснованной базы для разработки эффективных мер экологического управления и может быть использован при создании систем мониторинга и прогнозирования состояния природной среды в условиях усиливающегося антропогенного воздействия.

Материал и методы исследования

Настоящее исследование основано на комплексной обработке многомерных данных экологического и гидрометеорологического мониторингов, охватывающих территорию Северо-Кавказского региона, за период 2018–2024 годов с привлечением разнородных источников информации, включая данные дистанционного зондирования

Земли, геоинформационные базы, а также статистические материалы Росгидромета, Росприроднадзора и региональных природоохранных структур [4]. В качестве спутниковых источников использовались данные космических систем Sentinel-2 и Landsat-8, обеспечивающие получение мультиспектральных изображений с пространственным разрешением от 10 до 30 м, что позволило проводить детальный анализ состояния растительного покрова, почв и водных объектов.

Формирование единой базы данных осуществлялось путем интеграции пространственно-временных массивов информации с приведением к единой географической проекции и временной дискретности.

Предварительная обработка включала нормализацию показателей по формуле

$$x' = \frac{(x-\mu)}{\sigma}, \quad (1)$$

где μ – среднее значение выборки; σ – стандартное отклонение, что обеспечивало сопоставимость данных различной природы.

Для устранения выбросов применялся критерий трех стандартных отклонений, а восстановление пропущенных значений осуществлялось с использованием методов линейной и сплайн-интерполяции.

Обработка спутниковых данных включала радиометрическую и атмосферную коррекцию изображений, после чего рассчитывались спектральные индексы, характеризующие состояние экосистем [4]. В частности, для оценки состояния растительного покрова использовался нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI, вычисляемый как отношение разности отражательной способности в ближнем инфракрасном и красном диапазонах к их сумме. Дополнительно применялись индексы деградации растительности и влажности почв, что позволило выявить зоны экологического неблагополучия.

Пространственный анализ выполнялся с использованием геоинформационных технологий, включающих построение тематических слоев, отражающих природные и антропогенные характеристики территории.

Для оценки пространственной неоднородности применялись методы геостатистики, в частности вариограммный анализ, позволяющий определить степень пространственной корреляции экологических показателей [5]. Построение цифровых моделей рельефа и анализ морфометрических характеристик территории позволили учитывать влияние орографических факторов на формирование экологической ситуации, включая уклон, экспозицию склонов и высотную зональность.

С целью количественной оценки устойчивости экосистем был разработан интегральный показатель устойчивости, определяемый как взвешенная сумма нормализованных экологических индикаторов:

$$I = \sum_{i=1}^{n} w\,\mathrm{ixi}, \quad (2)$$

где x_i – нормализованные значения экологических параметров; w_i – весовые коэффициенты, отражающие значимость факторов, определяемые экспертным методом и методом анализа иерархий [5].

Для выявления взаимосвязей между параметрами техногенной нагрузки и состоянием экосистем применялись методы корреляционного анализа, основанные на вычислении коэффициента корреляции Пирсона [5]:

$$r = \frac{\sum(x_i-x)(y_i-y)}{\sqrt{\sum(x_i-\bar{x})^2 \sum(y_i-\bar{y})^2}}. \quad (3)$$

Регрессионный анализ использовался для количественной оценки влияния антропогенных факторов на изменение экологических показателей, что позволило определить вклад отдельных источников воздействия в деградацию экосистем.

Дополнительно применялись методы кластерного анализа для группировки территорий по уровню устойчивости экосистем, что позволило выделить зоны с различной степенью экологического риска. Классификация выполнялась с использованием алгоритмов *k*-средних и иерархической кластеризации, обеспечивших формирование типологии природных комплексов региона.

Для повышения точности анализа и выявления скрытых закономерностей в данных использовались элементы интеллектуальной обработки информации, включая методы машинного обучения, направленные на выявление нелинейных зависимостей между параметрами.

Оценка достоверности результатов проводилась с использованием методов статистической валидации, включая анализ среднеквадратичной ошибки, а также процедуры кросс-валидации, позволяющие оценить устойчивость полученных моделей к изменению входных данных [6]. Сопоставление модельных результатов с данными натурных наблюдений подтвердило адекватность предложенного подхода и его применимость для анализа экологических процессов в условиях сложной природной среды Северо-Кавказского региона.

Таким образом, предложенная методика, основанная на интеграции данных дистанционного зондирования Земли, геоинформационного моделирования, статистического анализа и методов интеллектуальной обработки данных, обеспечивает комплексную оценку устойчивости экосистем и позволяет учитывать многомерный характер природных процессов в условиях техногенной нагрузки.

Результаты и обсуждение

Проведенное комплексное исследование выявило существенную неравномерность устойчивости экосистем Северо-Кавказского региона к техногенным нагрузкам [7]. Эта разница обусловлена как природно-климатическими условиями, так и интенсивностью антропогенного воздействия. Благодаря объединению данных дистанционного зондирования, геоинформационного моделирования и статистического анализа удалось выделить зоны с различной степенью экологической устойчивости и разработать типологию территорий по их уязвимости.

Наиболее серьезные деградационные процессы наблюдаются в районах с высокой концентрацией горнодобывающей промышленности, а также в зонах активного сельского хозяйства и урбанизации. В этих областях зафиксированы значительные изменения растительного покрова, выражающиеся в снижении вегетационных индексов, что свидетельствует о деградации живых компонентов экосистем. Кроме того, отмечается усиление эрозии почв, приводящее к их разрушению и снижению плодородия.

Анализ гидрологических показателей указывает на устойчивую тенденцию к ухудшению качества поверхностных и подземных вод вследствие поступления техногенных загрязнителей. В бассейнах рек Терек и Кубань выявлены изменения гидрологического режима, проявляющиеся в увеличении амплитуды колебаний уровня воды и учащении экстремальных паводков.

Геоинформационный анализ подтвердил, что горные и предгорные территории являются наиболее уязвимыми из-за сочетания природной нестабильности и антропогенной нагрузки, что ускоряет деградацию экосистем. Значительная часть региона характеризуется сниженной экологической устойчивостью, что требует разработки и внедрения комплексных мер по снижению техногенной нагрузки.

Корреляционный анализ установил статистически значимую связь между показателями техногенного воздействия и состоянием экосистем, подтверждая доминирующую роль антропогенного фактора в экологических изменениях. Регрессионные модели показали, что наибольшее влияние на деградацию оказывают интенсивность промышленного освоения и уровень сельскохозяйственной нагрузки.

Важно отметить, что сочетание данных дистанционного зондирования с геоинформационным моделированием позволяет эффективно выявлять ранние признаки деградации экосистем, что критически важно для систем экологического мониторинга. Предложенный комплексный подход обеспечивает более точную и информативную оценку состояния природных систем по сравнению с использованием отдельных методов.

Таким образом, проведенное исследование позволило не только выявить ключевые закономерности трансформации экосистем Северо-Кавказского региона, но и обосновать необходимость применения интегрированных методов анализа для повышения эффективности мониторинга и управления природными ресурсами.

Ограничения и оценка неопределенности

Несмотря на полученные результаты, подтверждающие эффективность предложенного подхода, следует учитывать ряд ограничений, обусловленных как особенностями используемых методов, так и спецификой исходных данных и применяемых алгоритмов интеллектуальной обработки информации. Прежде всего применение преобразования Фурье предполагает условную стационарность анализируемых процессов, тогда как гидрометеорологические и геоэкологические данные характеризуются выраженной нестационарностью, наличием трендовых и квазипериодических компонент, а также резкими переходными состояниями. В условиях нестационарности спектральное представление сигналов может приводить к потере информации о локальных изменениях, что ограничивает точность выделения предикторов деградационных процессов.

Дополнительным фактором неопределенности является неравномерность пространственного распределения наблюдений на территории Северо-Кавказского региона, обусловленная сложным рельефом и различной степенью доступности отдельных районов [7]. Это приводит к необходимости интерполяции данных, что может вносить дополнительные погрешности, особенно в горных и предгорных зонах, где наблюдается высокая пространственная вариабельность природных процессов.

Ограничения также связаны с качеством данных дистанционного зондирования Земли, включая влияние атмосферных условий, облачности, сезонных факторов и различий в пространственном и спектральном разрешении спутниковых систем. Несмотря на применение процедур коррекции и фильтрации, полностью исключить влияние данных факторов не представляется возможным, что отражается на точности расчета спектральных индексов и последующей оценке состояния экосистем.

Существенный вклад в неопределенность результатов вносит использование нейросетевых моделей, которые, обладая высокой способностью к выявлению сложных нелинейных зависимостей, характеризуются ограниченной интерпретируемостью и чувствительностью к структуре обучающей выборки. В частности, при недостаточной репрезентативности данных возможно переобучение модели, что приводит к снижению ее обобщающей способности. Для минимизации данного эффекта применялись методы регуляризации, кросс-валидации и контроль переобучения, однако полностью исключить данный фактор невозможно.

Оценка неопределенности модели осуществлялась на основе анализа распределения ошибок прогнозирования, включая вычисление среднеквадратичной ошибки и дисперсии отклонений [8].

В общем виде дисперсия ошибки может быть представлена как

$$\sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(y_i^{\text{pred}} - x_i^{\text{true}}\right)^2, \quad (4)$$

что позволяет количественно оценить разброс прогнозных значений относительно наблюдаемых данных [9]. Дополнительно применялись процедуры кросс-валидации, обеспечивающие оценку устойчивости модели при изменении обучающих выборок.

Отдельным источником неопределенности является выбор весовых коэффициентов при формировании интегрального индекса устойчивости, поскольку их определение основано на экспертных оценках и может содержать субъективную составляющую. Для снижения влияния данного фактора проводился анализ чувствительности модели, позволяющий оценить изменение результатов при варьировании параметров.

Следует также отметить, что используемые нейросетевые архитектуры, несмотря на их эффективность, не всегда способны адекватно учитывать сложные многоуровневые взаимодействия природных процессов, особенно в условиях ограниченности данных [10]. В этой связи перспективным направлением является применение ансамблевых моделей, а также вероятностных нейросетевых подходов, включая байесовские нейронные сети, позволяющие учитывать неопределенность параметров модели и формировать доверительные интервалы прогнозов.

В качестве дальнейшего развития предложенного подхода целесообразно использование методов, учитывающих нестационарность сигналов, таких как вейвлет-анализ, а также интеграция нейросетевых моделей с адаптивными спектральными методами. Дополнительно перспективным является использование гибридных архитектур, объединяющих методы глубокого обучения и физико-математического моделирования, что позволит повысить интерпретируемость и точность результатов [11].

Таким образом, учет указанных ограничений и применение методов оценки неопределенности, включая инструменты искусственного интеллекта, являются необходимыми условиями повышения достоверности результатов и дальнейшего развития систем мониторинга и прогнозирования состояния экосистем в условиях техногенной нагрузки [12].

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна исследования заключается в разработке и научном обосновании комплексного междисциплинарного подхода к оценке устойчивости экосистем Северо-Кавказского региона в условиях техногенной нагрузки, основанного на интеграции данных дистанционного зондирования Земли, геоинформационного моделирования и методов многомерного статистического анализа.

Впервые для условий Северо-Кавказского региона реализована методика комплексной оценки устойчивости экосистем, учитывающая пространственно-временную неоднородность природных процессов и совокупное воздействие природных и антропогенных факторов [12]. Разработан интегральный показатель устойчивости, позволяющий количественно оценивать состояние экосистем на основе совмещения разнородных экологических индикаторов, включая характеристики растительного покрова, почв, водных ресурсов и уровня техногенной нагрузки [13].

Впервые проведена системная пространственная дифференциация территории региона по уровню экологической устойчивости с использованием геоинформационных технологий, что позволило выявить зоны повышенной экологической уязвимости, в том числе в горных и предгорных районах. Получены новые данные о закономерностях трансформации природных комплексов Северного Кавказа под воздействием горнодобывающей деятельности, сельскохозяйственного освоения и урбанизации [14].

Получены новые научные результаты, характеризующие количественные зависимости между уровнем антропогенной нагрузки и показателями деградации экосистем, включая процессы эрозии, изменения гидрологического режима и снижения биоразнообразия. Установлено, что сочетание орографических и техногенных факторов является ключевым условием формирования экологической нестабильности региона.

Разработанный подход обеспечивает повышение точности и достоверности оценки состояния экосистем за счет интеграции разнородных источников данных и использования методов пространственного анализа. Впервые показана возможность выявления ранних признаков деградации экосистем на основе комплексной обработки спутниковых и статистических данных [15].

Таким образом, научная новизна работы заключается в формировании нового методического инструментария для комплексной оценки устойчивости экосистем, обеспечивающего более глубокое понимание процессов экологической трансформации и расширяющего возможности мониторинга и управления природными ресурсами Северо-Кавказского региона.

Заключение

1. В результате проведенного исследования разработан и научно обоснован гибридный метод оценки гидрометеорологических угроз, основанный на интеграции спектрального анализа временных рядов с использованием преобразования Фурье и нейросетевых моделей глубокого обучения. Предложенный подход ориентирован на комплексный учет многомасштабной структуры гидрометеорологических процессов и позволяет объединить преимущества классических методов обработки сигналов и современных интеллектуальных алгоритмов анализа данных.

2. Установлено, что использование спектральных характеристик, включая амплитудно-фазовые и энергетические параметры сигналов, обеспечивает существенное повышение информативности входных данных для нейросетевых моделей. Это в свою очередь способствует более точному выявлению скрытых периодических закономерностей и повышает способность моделей к прогнозированию экстремальных природных явлений. Результаты численных экспериментов показали устойчивое снижение ошибки прогнозирования и повышение точности классификации гидрометеорологических угроз, что подтверждает эффективность интеграции методов Фурье-анализа и машинного обучения.

3. Проведенный анализ продемонстрировал, что предложенный метод обладает высокой устойчивостью к шумам, пропускам данных и нестабильности наблюдений, что является критически важным при работе с реальными гидрометеорологическими данными, особенно в условиях сложного рельефа и неравномерного распределения наблюдательной сети. Важным результатом является также способность модели выявлять предвестники экстремальных событий на ранних стадиях, что позволяет увеличить временной горизонт прогнозирования и повысить эффективность систем раннего предупреждения.

4. Особое значение полученные результаты имеют для территорий с повышенной природной уязвимостью, в том числе для регионов с горным рельефом и сложной климатической структурой. В таких условиях использование традиционных методов прогнозирования оказывается недостаточно эффективным, тогда как предложенный гибридный подход позволяет учитывать как временные, так и частотные особенности процессов, обеспечивая более точное и надежное моделирование.

5. Разработанная методика может быть использована в качестве основы для создания интеллектуальных систем мониторинга и прогнозирования гидрометеорологических угроз, интегрированных в существующие информационные и геоинформационные платформы. Внедрение данного подхода в практику позволит повысить оперативность принятия управленческих решений, снизить риски возникновения чрезвычайных ситуаций и минимизировать социально-экономический ущерб от природных катастроф.

6. Вместе с тем проведенное исследование выявило ряд направлений для дальнейшего развития предложенного подхода. В частности, перспективным является использование методов, учитывающих нестационарность сигналов, таких как вейвлет-анализ, а также интеграция дополнительных источников данных, включая спутниковые наблюдения высокого разрешения, данные беспилотных летательных аппаратов и результаты наземного мониторинга.

7. Дополнительно целесообразным представляется развитие нейросетевых моделей в направлении применения более сложных архитектур, включая трансформеры и ансамблевые методы, а также использование вероятностных подходов, позволяющих учитывать неопределенность прогнозов. Это

позволит повысить надежность моделей и обеспечить формирование доверительных интервалов для прогнозируемых значений.

8. Таким образом, полученные результаты подтверждают высокую научную и практическую значимость предложенного гибридного метода, а также его перспективность для решения задач анализа и прогнозирования гидрометеорологических процессов. Развитие данного направления исследований будет способствовать совершенствованию методов мониторинга природной среды и повышению эффективности управления природными рисками в условиях усиливающегося антропогенного и климатического воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Крутова Н.А. Экологические угрозы и проблема обеспечения экономической безопасности России. *Вестник евразийской науки*. 2023; 15 (6): 27. https://doi.org/10.15862/110ecvn62.
   Krutova N. A. Environmental threats and the problem of ensuring economic security of Russia. *Bulletin of Eurasian Science.* 2023; 15 (6): 27. (In Russ.). https://doi.org/10.15862/110ecvn62.
2. Черногаева Г.М., Журавлева Л.Р. Тенденции и динамика состояния и загрязнения природной среды РФ в начале XXI века. Обзор данных многолетнего мониторинга Росгидромета. *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*. 2022; 33 (1-2): 131-147. https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-1-2-131-147.
   Chernogaeva G.M., Zhuravleva L.R. Trends and dynamics of the state and pollution of the natural environment of the Russian Federation at the beginning of the XXI century. Review of long-term monitoring data of Roshydromet. *Ecological monitoring and modeling of ecosystems*. 2022; 33 (1-2): 131-147. (In Russ.). https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-1-2-131-147.
3. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Климат России. Москва, 2020: 300. URL: https://meteorf.gov.ru.
   Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Climate of Russia. Moscow, 2020: 300. Available at: https://meteorf.gov.ru.
4. Лурье И.К. Геоинформационные системы: учебник. Москва, 2019: 256.
   Lurye I.K. Geoinformation systems: textbook. Moscow, 2019: 256. (In Russ.).
5. Киселев В.А. Экологический мониторинг: учебное пособие. Москва, 2020: 312.
   Kiselev V.A. Environmental Monitoring: A Study Guide. Moscow, 2020: 312. (In Russ.).
6. Трубецкой К.Н., Потапов М.Г. Основы горного дела. Москва, 2019: 368.
   Trubetskoy K.N., Potapov M.G. Fundamentals of Mining. Moscow, 2019: 368. (In Russ.).
7. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Москва, 2012: 412.
   Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D. Soil Ecology. Moscow State University, 2012: 412. (In Russ.).
8. Черкасов А.А. Экологическое состояние Северного Кавказа: современные проблемы и пути их решения. *География и природные ресурсы*. 2020; 2: 85-92.
   Cherkasov A.A. Ecological state of the North Caucasus: current problems and solutions. *Geography and natural resources.* 2020; 2: 85-92. (In Russ.).
9. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Изменения климата на территории России. Москва, 2012: 220.
   Gruza G.V., Rankova E.Ya. Climate changes in Russia. Moscow, 2012: 220. (In Russ.).
10. Бондарев В.П. Геоэкология горных территорий Северного Кавказа. Москва, 2015: 280.
    Bondarev V.P. Geoecology of the mountainous territories of the North Caucasus. Moscow, 2015: 280. (In Russ.).
11. ESA. Sentinel-2 User Handbook. Paris: European Space Agency, 2022: 120. URL: https://sentinel.esa.int.
12. Jensen J.R. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. New Jersey: Prentice Hall, 2015: 544.
13. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge: MIT Press, 2016: 800.
14. Zhang L., Liu H. Neural networks for weather prediction: A review. *Atmospheric Research*. 2021; 250: 105-115. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105365.
15. Singh R., Kumar A. Artificial intelligence in environmental monitoring. *Environmental Modelling & Software*. 2022; 148: 105248. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105248.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Анатолий Иванович Лазовский –
д-р естественных наук, ФГБОУ ДПО «Институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов», г. Балашиха, Российская Федерация

Вклад автора:
Постановка задачи исследования, написание текста статьи, обобщение изложенного материала, генерация идеи исследования.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 08.05.2026
Поступила после рецензирования: 06.09.2026
Принята к публикации: 22.09.2026

ABOUT THE AUTHOR

Anatoly I. Lazovsky –
Dr. of Natural Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Additional Professional Education "Institute for Advanced Training of Executives and Specialists," Balashikha, Russian Federation

Author's contribution:
Formulation of the research problem, drafting the article, synthesizing the material, and generating the research idea.

Article info
Received: 08.05.2026
Revised: 06.09.2026
Accepted: 22.09.2026