

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ВОЛЖСКО-АЛЬБСКОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА НА УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ

Н.Д. Дубов¹, О.М. Розенталь¹, Е.Ю. Куликова^{2,3}

¹ Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия, e-mail: kulikova_ey@mirea.ru

³ Национальный университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

Аннотация: Представлены результаты комплексного анализа качества подземных вод волжско-альбского водоносного горизонта в условиях крупного мегаполиса на основе данных мониторинга 2018–2025 гг. Особое внимание уделено сульфатной, кислотной и хлоридной агрессии подземных вод, которые могут привести к выщелачиванию бетона и коррозии элементов подземных и заглубленных сооружений города. Проведено 149 анализов трех ключевых компонентов: ионов аммония (NH_4^+), кальция (Ca^{2+}) и нефтепродуктов из сети 10 наблюдательных скважин на глубинах 15–45 м. Применены методы описательной статистики, корреляционного анализа, моделирования временных рядов (ARIMA), линейных трендовых моделей, а также анализ пространственной зависимости (коэффициент Спирмена, тест Мантелла) с учетом расстояния до реки. Установлено, что концентрация NH_4^+ колеблется в диапазоне 0,06–67,0 мг/л (среднее 5,03 мг/л, коэффициент вариации $\text{CV} = 48\text{--}152\%$), Ca^{2+} – 4,53–333,0 мг/л (среднее 73,44 мг/л), а суммарное количество нефтепродуктов снизилось на 65–88% за исследуемый период. Максимальные загрязнения зафиксированы в центре города и в зонах с интенсивным автомобильным движением, минимальные – в парковых зонах. Корреляционный анализ показал слабую положительную связь между NH_4^+ и Ca^{2+} ($r = 0,299$), что указывает на локальные особенности и источники загрязнения. Прогноз на 2026 год свидетельствует о снижении концентраций нефтепродуктов (ожидаемое снижение – на 15–20%) и стабилизации качества воды в большинстве районов, однако в центральной части исследуемой территории прогнозируется рост концентраций NH_4^+ на 10–15%.

Ключевые слова: подземные воды, волжско-альбский горизонт, качество воды, временные ряды, ARIMA, прогнозирование, мониторинг, пространственная корреляция.

Для цитирования: Дубов Н. Д., Розенталь О. М., Куликова Е. Ю. Статистическая оценка и прогнозирование качества подземных вод волжско-альбского водоносного горизонта на урбанизированной территории // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 8. – С. 53–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_8_0_53.

Statistical assessment and forecasting of the quality of groundwater in the Volga-Alb aquifer in an urbanized area

N.D. Dubov¹, O.M. Rozental¹, E.Yu. Kulikova^{2,3}

¹ Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

³ University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia, e-mail: kulikova_ey@mirea.ru

Abstract: The article presents the results of a comprehensive analysis of the quality of groundwater in the Volga-Alb aquifer in a large metropolis based on monitoring data from 2018 to 2025. Special attention is paid to the sulfate, acid, and chloride aggression of groundwater, which can lead to the leaching of concrete and corrosion of underground and submerged structures in the city. A total of 149 analyses were conducted on three key components: ammonium ions (NH_4^+), calcium (Ca^{2+}), and petroleum products (PP) from a network of 10 observation wells at depths of 15–45 m. The methods used include descriptive statistics, correlation analysis, time series modeling (ARIMA), linear trend models, and spatial dependence analysis (Spearman coefficient, Mantel test) taking into account the distance to the river. It was found that the concentration of NH_4^+ ranges from 0.06 to 67.0 mg/L (mean 5.03 mg/L, CV = 48–152%), Ca^{2+} ranges from 4.53 to 333.0 mg/L (mean 73.44 mg/L), and total petroleum products decreased by 65–88% during the study period. Maximum pollution levels were recorded in the city center and in areas with heavy traffic, while minimum levels were recorded in park areas. The correlation analysis showed a weak positive relationship between NH_4^+ and Ca^{2+} ($r = 0.299$), which indicates local characteristics and sources of pollution. The forecast for 2026 indicates a decrease in petroleum product concentrations (expected decrease of 15–20%) and stabilization of water quality in most areas, but an increase in NH_4^+ concentrations by 10–15% is predicted in the central part of the study area.

Key words: groundwater, Volga-Albian horizon, water quality, time series, ARIMA, forecasting, monitoring, spatial correlation

For citation: Dubov N. D., Rozental O. M., Kulikova E. Yu. Statistical assessment and forecasting of the quality of groundwater in the volga-alb aquifer in an urbanized area. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(8):53–66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_8_0_53.

Введение

Мониторинг качества подземных вод является важным элементом управления водными ресурсами в условиях урбанизации и высокой антропогенной нагрузки [1, 2]. Волжско-альбский водоносный горизонт не используется как основной источник питьевого водоснабжения мегаполиса, однако имеет прикладное значение в связи с активным освоением подземного пространства и развитием инженерно-коммунальной инфраструктуры, что обуславливает устойчивое техногенное воздействие на качество вод [1, 2].

Вопрос качества грунтовых вод критически важен для строительства в Москве, где их влияние многогранно [3, 4]. Ключевые риски для подземных и заглубленных сооружений создают подтоп-

ление и агрессивность вод, особенно при строительстве открытым способом, поэтому необходимо учитывать их воздействие при строительстве глубоких котлованов.

Современные исследования показывают, что в условиях плотной городской застройки даже водоносные горизонты глубиной 15–45 м подвержены локальному загрязнению [5, 6]. Нарушение естественных фильтрационных барьеров при строительстве подземных сооружений и наличие протяженных инженерных коммуникаций повышают уязвимость подземных вод.

Согласно данным государственного мониторинга, основными загрязняющими компонентами подземных вод урбанизированных территорий являются соединения азота и нефтепродукты (НПР),

превышения нормативов по которым носят массовый характер [7]. Источники данных загрязнений преимущественно локальны и связаны с утечками хозяйственно-бытовых сточных вод, изношенными коммунальными сетями, транспортной нагрузкой и объектами топливно-энергетической инфраструктуры [8, 9].

Формирование качества подземных вод волжско-альбского горизонта определяется сочетанием техногенных и природных факторов, включая орографические особенности территории и неоднородность землепользования, что обуславливает пространственную мозаичность гидрохимических показателей [10]. Именно качество воды этого горизонта является одним из важнейших факторов, который необходимо учитывать при проектировании подземных и заглубленных сооружений в Москве. Особое внимание необходимо уделять следующим факторам:

- состав и уровень агрессивности (воды горизонта по химическому составу в основном гидрокарбонатные, кальциевые). Чаще всего минерализация невысока, но могут встречаться гидрокарбонатно-сульфатные воды, способные проявлять слабую или среднюю агрессивность к бетону. Основные риски агрессивного воздействия на подземные конструкции проявляются в виде:

1. выщелачивания бетона (кислотной агрессии) — содержащиеся в воде кислоты (в т.ч. углекислота или техногенные загрязнения) вступают в реакцию с цементным камнем, разрушая его структуру;

2. коррозии арматуры — агрессивные соли (особенно хлориды) разрушают пассивную оксидную пленку на арматуре, приводя к ее ржавлению и последующему разрушению бетона изнутри;

3. сульфатной агрессии — сульфаты вступают в реакцию с цементом, вызывая его набухание и растрескивание;

- уязвимость к загрязнению (антропогенный фактор). Для строительства это означает, что даже в изначально неагрессивной среде из-за техногенных утечек может локально формироваться химически активная среда.

С 2008 г. в Москве выполняется гидрогеологическое моделирование для прогнозирования изменений подземных вод из-за строительства, прежде всего подземного. Согласно Постановлению № 868-ПП обязательным является постоянный мониторинг грунтовых вод для отслеживания негативных процессов (подтопления, изменения химического состава). Московские городские строительные нормы (МГСН 2.07-97) прямо указывают на необходимость защиты материала конструкций подземного (заглубленного) сооружения от агрессивного воздействия подземных вод и тщательной гидроизоляции стен и дна сооружения.

Цель исследования — выявление пространственно-временных закономерностей изменения качества подземных вод волжско-альбского водоносного горизонта в условиях мегаполиса с применением современных статистических методов и построение прогностических моделей на период до 2026—2030 гг. Новизна работы заключается в комплексном учете временной динамики и пространственных факторов при оценке загрязнения подземных вод городской территории.

Объект и методы исследования

Рассматривается волжско-альбский водоносный горизонт на территории крупного мегаполиса. Отбор проб осуществлялся из 10 наблюдательных скважин, охватывающих различные районы и условия (рис. 1).

Скважины оборудованы на глубинах 15—45 м и расположены в различных ландшафтно-техногенных условиях.

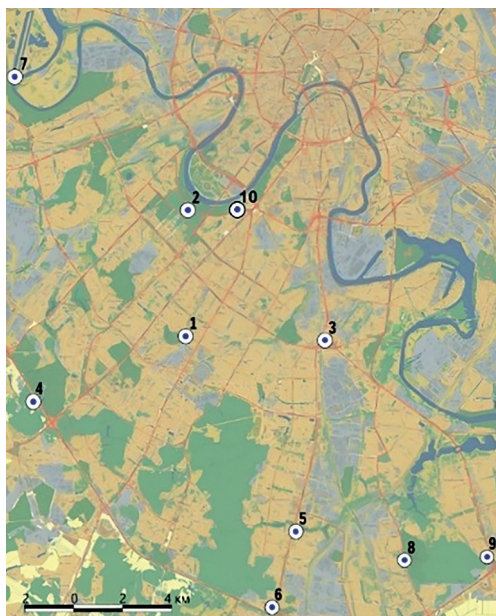


Рис. 1. Локализация скважин
Fig. 1. Well localization

Скважины № 1 и № 3 приурочены к центральной плотно застроенной части города (25–35 м), при этом район скв. № 3 характеризуется высокой транспортной нагрузкой. Скважины № 2, № 7 и № 10 расположены в пойме крупной реки (15–20 м). Скважины № 4 и № 6 находятся на окраинах города вблизи магистралей (40–45 м). Скважина № 5 расположена в жилом районе (~35 м), а № 8 и № 9 — в смешанной парково-жилой зоне (30–35 м). По удаленности от реки выделены прибрежные, центральные и периферийные группы скважин.

В анализ включены данные мониторинга качества подземных вод [11, 12] по трем показателям: аммоний (NH_4^+), нефтепродукты и кальций (Ca^{2+}) за период 2018–2025 гг. Отбор проб проводился 1–2 раза в год, всего выполнено 149 анализов; на каждую скважину приходится 12–16 наблюдений. Данные представлены в виде таблицы с датами отбора проб и соответствующими концентрациями компонентов.

Первичная обработка включала расчет описательной статистики (минимум, максимум, среднее, медиана, SD, CV, n) для оценки уровня и вариабельности загрязнения. Анализ временных рядов проводился на основе графиков динамики концентраций с выявлением общих тенденций и эпизодических аномалий; сглаживание и интерполяция применялись исключительно для визуализации.

Пространственный анализ выполнен путем сопоставления групп скважин по условиям размещения, построения диаграмм размаха и оценки связи средних концентраций с расстоянием до реки с использованием ранговой корреляции Ч.Э. Спирмена. Дополнительно исследована пространственная автокорреляция методом Н. Мантелла (1000 перестановок) на основе матриц расстояний между скважинами и различий концентраций.

Сопоставление результатов с нормативами выполнено с использованием ПДК для питьевых подземных вод: 2,0 мг/л для NH_4^+ и 0,1 мг/л для нефтепродуктов. Для кальция норматив не установлен; концентрации порядка 100 мг/л и выше рассматривались как индикатор повышенной минерализации. Статистический анализ выполнен с применением электронных таблиц и языка программирования Python.

Результаты и обсуждение

Базовые статистические показатели качества подземных вод по трем компонентам суммарно по всем скважинам приведены в табл. 1. Расходование выборки: концентрация аммония измерена в 147 пробах (некоторые пропуски данных), кальция и нефтепродукты — в 149 пробах.

Анализ табл. 1 показывает высокий разброс значений, особенно для аммония и нефтепродуктов. Аммоний характеризуется наибольшей вариабельно-

Таблица 1

Базовые статистические показатели качества подземных вод (по совокупности данных 2018–2025 гг.). SD – стандартное отклонение
Basic statistical indicators of groundwater quality (based on a set of data from 2018 to 2025).
SD – standard deviation

Параметр	n	Среднее, мг/л	SD, мг/л	Мин, мг/л	Макс, мг/л
NH_4^+	147	5,03	9,37	0,06	67,0
Ca^{2+}	149	73,44	62,96	4,53	333,0
НПР	149	0,98	1,47	0,037	7,8

стью ($\text{CV} \approx 48 - 152\%$), что указывает на неустойчивое, эпизодическое поступление загрязнения. Для Ca^{2+} вариабельность умеренная ($\text{CV} \approx 24 - 108\%$) и отражает преимущественно природные различия условий, тогда как нефтепродукты демонстрируют значительную изменчивость ($\text{CV} \approx 62 - 133\%$) и общую тенденцию к снижению, при сохранении превышений ПДК.

Значения средних концентраций заметно различаются в зависимости от скважины [13]. Концентрации иона аммония варьируются от 0,1–0,5 мг/л, на самых чистых участках — до десятков мг/л в наиболее неблагоприятных точках; рекордные показатели достигают 67 и 54 мг/л. В некоторых скважинах превышения нормативов носят многократный и регулярный характер. Нефтепродукты фиксируются повсеместно, и в подавляющем большинстве случаев их концентрация превышает

0,1 мг/л; пиковые значения (5–8 мг/л) свидетельствуют о наличии локальных очагов нефтяного загрязнения. Концентрации Ca^{2+} изменяются в широком диапазоне ($\approx 5 \geq 300$ мг/л), при этом повышенные уровни (>150 мг/л) характерны главным образом для центральной части города, тогда как в пойме и на окраинах они, как правило, ниже 50 мг/л.

Пространственное распределение показывает, что загрязнение достигает пика в центральных районах со стесненными условиями городской застройки и обширным коммунальным хозяйством и спадает до минимума в парковых зонах. Усредненные концентрации компонентов по группам скважин за весь период наблюдений приведены в табл. 2.

Центральная часть города (скв. 1, 10) отличается самыми высокими средними уровнями аммония (~12 мг/л) и кальция (~180 мг/л), а также максимальными превышениями нормативных значений.

Таблица 2

Распределение средних значений NH_4^+ и Ca^{2+} в подземной гидросфере по административным частям города
Distribution of average values of NH_4^+ and Ca^{2+} in the underground hydrosphere by administrative parts of the city

Район / условия	Скважины	NH_4^+ , мг/л	Ca^{2+} , мг/л
Центр города	1, 10	~12,4	~184
Жилые районы	2, 8	~0,9	~34,5
Автодороги (окраин)	3, 6, 9	~6,8	~19,1
Парки	4, 7	~0,5	~44,7
Пойма реки	5	~10,8	~104,2

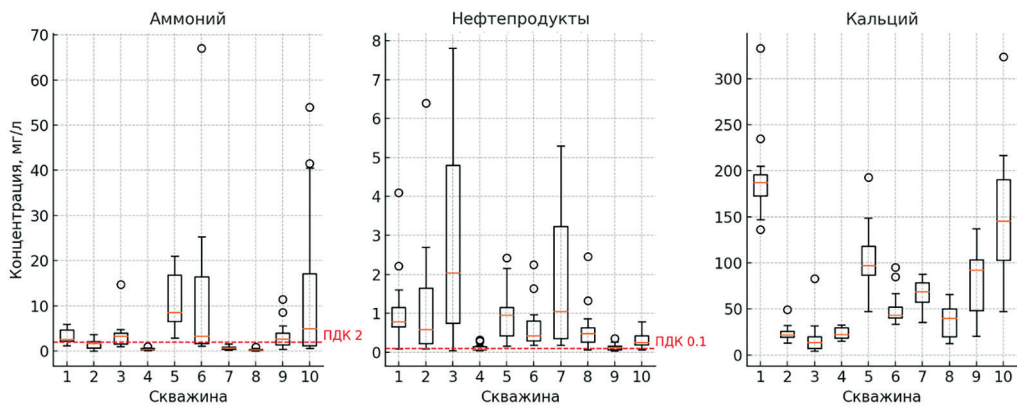
В парках (скв. 4, 7), напротив, содержание аммония наименьшее (~0,5 мг/л), тогда как кальций держится на умеренном уровне (~45 мг/л). Жилая застройка (скв. 2, 8) показывает относительно невысокий уровень аммония (~0,9 мг/л) и низкий уровень кальция (~35 мг/л). Окраинные участки у дорог (скв. 3, 6, 9) дают повышенный аммоний (~6–7 мг/л) на фоне крайне низкого уровня кальция (~19 мг/л). Пойменная скважина (скв. 5, единственная вне центра) отличается неоднозначной картиной: концентрация аммония высока (~10,8 мг/л), как в центре, а кальция — умеренно повышена (~104 мг/л). Это указывает на то, что роль речной зоны в формировании состава подземных вод неодинакова для разных показателей.

Распределение иона аммония [14] отличается фрагментарностью. Как показано на рис. 2, группа скважин № 5, 6, 10 имеет медианы и размах значений NH_4^+ значительно выше остальных (ящики на boxplot заметно выше линии 2 мг/л); скв. 9 также выдает ряд повышенных значений (выбросы до ~11 мг/л), хотя

ее медиана ниже. Скважины № 4, 7 и 8 характеризуются стабильно низкими концентрациями аммония, преимущественно ниже ПДК. Скважины № 1, 2 и 3 занимают промежуточное положение (средние значения порядка 2–4 мг/л), тогда как наибольшая загрязненность аммонием характерна для жилых и транспортно-нагруженных зон (скв. 5, 6, 10).

Полученная картина согласуется с функциональным зонированием территории и указывает на роль утечек канализационных коммуникаций и поступления сточных вод; центральная часть города характеризуется умеренным загрязнением, вероятно, вследствие большей глубины залегания горизонта и более герметичной инфраструктуры.

Пространственная картина по нефтепродуктам также отличается неоднородностью [15, 16]. Самые высокие средние показатели обнаружены там, где проходят крупные транспортные артерии, а также в зоне поймы (скв. 2, 3, 6, 7, 10). Самые низкие — в парковой зоне и на некоторых периферийных участках (скв. 4, 9). Предположительно,



По оси X отложены номера скважин, по оси Y – концентрация, мг/л (в логарифмическом масштабе для удобства сравнения диапазонов). Красными пунктирными линиями показаны ПДК: 2 мг/л для NH_4^+ и 0,1 мг/л для нефтепродуктов (для кальция нормативного ограничения нет)

Рис. 2. Диаграммы размаха концентраций аммония (слева), нефтепродуктов (в центре) и кальция (справа) по скважинам за весь период наблюдений (2018–2025 гг.)

Fig. 2. Ammonium (left), petroleum products (center), and calcium (right) concentration range diagrams for wells over the entire observation period (2018–2025)

обогащение пойменных вод нефтепродуктами [17] связано с накоплением городского стока и уязвимостью неглубокого водоносного горизонта, тогда как в центре города главный источник — интенсивное автотранспортное движение.

Распределение кальция в подземных водах практически полностью определяется природными гидрогеохимическими условиями [18]. Там, где происходит интенсивная инфильтрация речных и поверхностных вод, фиксируются низкие значения Ca^{2+} . Участки с затяжным водообменом и контактом с карбонатами дают высокие концентрации [19, 20]. Интерпретация парных показателей такова: комбинация низкого кальция с высокими содержаниями аммония и нефтепродуктов — следствие притока техногенных вод, разбавленных чистыми природными водами; напротив, одновременное повышение концентрации и антропогенных компонентов говорит о локальном загрязнении без разбавления.

Для нефтепродуктов обнаружена значимая отрицательная корреляция усредненной концентрации с расстоянием до русла реки ($\rho \approx -0,5$; $\rho < 0,05$). Это

подтверждает, что эффект близости к реке проявляется для этих компонентов по-своему, а именно — ведет к их накоплению в пойменной зоне. Для аммония зависимость от расстояния до реки не установлена ($\rho > 0,5$), что свидетельствует о преобладании локальных источников загрязнения.

Пространственная автокорреляция

Проверка на сходство химического состава соседних скважин показала его отсутствие. Коэффициент корреляции (К.Д. Пирсона) между матрицей взаимных расстояний между скважинами и матрицей разностей средних концентраций оказался близок к нулю и недостоверен по тесту Н. Мантелла ($\rho > 0,2$). Это означает, что географическая близость скважин не приводит к схожести их химического состава: напротив, соседние точки могут иметь совершенно разный уровень загрязнения. Например, скв. 10 и 7 находятся в одной пойме и в 1 км друг от друга, но уровень аммония в скв. 10 в десятки раз выше, чем в скв. 7. Отсутствие пространственной

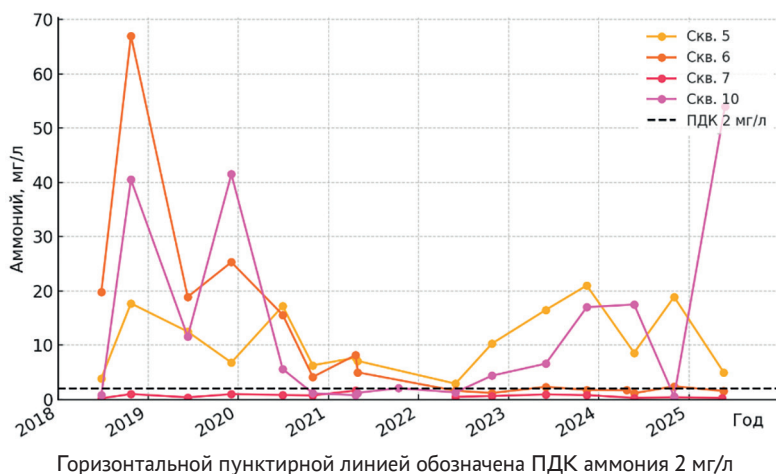


Рис. 3. Динамика концентрации аммония (NH_4^+) в подземных водах для примеров скважин: № 5 (жилой район), № 6 (окраина у автодороги), № 7 (пойма реки), № 10 (пойма реки)

Fig. 3. Dynamics of ammonium (NH_4^+) concentration in groundwater for the examples of wells: No. 5 (residential area), No. 6 (the outskirts near the road), No. 7 (the river floodplain), No. 10 (the river floodplain)

автокорреляции подтверждает локальный, очаговый характер загрязнения подземных вод мегаполиса.

Временные ряды и прогнозирование

Динамика концентраций

Временные ряды концентраций аммония и нефтепродуктов демонстрируют различные тенденции.

На рис. 3 приведены кривые концентраций NH_4^+ для четырех характерных скважин, иллюстрирующих типичные ситуации. В скв. 7 аммоний удерживается на фоновом уровне $\sim 0,5 - 1,5$ мг/л, без явного тренда и без превышений ПДК: временные колебания невелики, и носят случайный характер. В скв. 5 концентрации стабильно повышены на протяжении всего периода: практически каждое измерение превышает 2 мг/л, диапазон колебаний $\sim 3 - 18$ мг/л.

Полученные данные указывают на преимущественно коммунально-бытовой характер аммонийного загрязнения. Для скв. 10 характерны повторяющиеся резкие всплески концентраций (до 40 – 54 мг/л в 2019 и 2023 – 2025 гг.) на фоне

более низких промежуточных уровней, что свидетельствует о периодическом поступлении мощных загрязнений с их последующим разбавлением. В скв. 6 зафиксирован одиночный экстремум (67 мг/л в 2018 г.), после которого концентрации резко снизились и стабилизировались, что, вероятно, связано с устранением аварийного источника. В целом для аммония не выявлено единой временной тенденции; динамика носит локально-очаговый характер с чередованием фаз относительного благополучия и резких ухудшений, типичных для урбанизированных территорий при аварийности коммунальных сетей [3]. Зафиксированные максимумы (до 33 ПДК) превышают уровни, описанные в литературе для других регионов [5, 7].

Аммоний может рассматриваться как индикатор утечек хозяйственно-бытовых сточных вод. Стабильно низкие концентрации (скв. 4, 7, 8) указывают на отсутствие значимых источников загрязнения, тогда как высокие и повторяющиеся превышения (скв. 5, 6, 10) свидетельствуют о наличии постоянных или периодически активных локальных

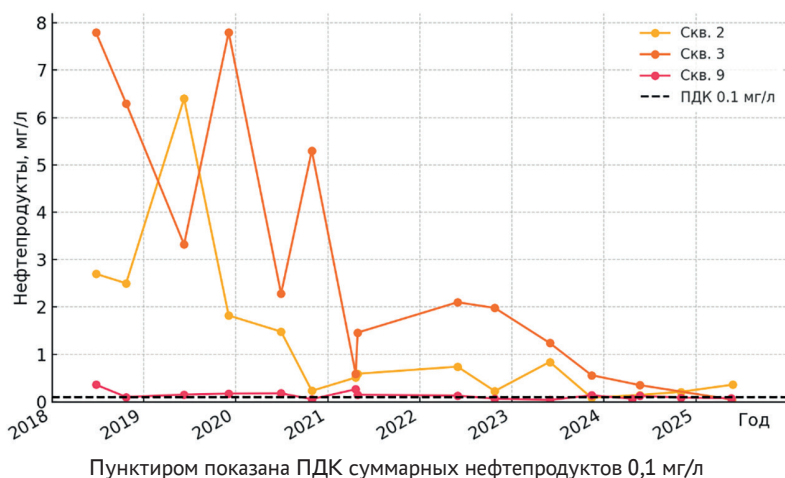


Рис. 4. Динамика концентрации нефтепродуктов в подземных водах для примеров скважин: № 3 (центр города, транспортная магистраль), № 2 (прибрежная зона), № 9 (парковая зона)

Fig. 4. Dynamics of the concentration of petroleum products in groundwater for the examples of wells: No. 3 (city center, transport highway), No. 2 (coastal zone), No. 9 (park zone)

источников и необходимости повышенного контроля.

На рис. 4 показаны временные ряды нефтепродуктов для трех скважин с разными тенденциями. В скв. 3 (центр, дорожная нагрузка) исходно наблюдались крайне высокие содержания НПР — до ~7–8 мг/л в 2018–2019 гг.

В начале мониторинга в ряде скважин фиксировались пиковые концентрации нефтепродуктов, однако впоследствии произошло их выраженное падение. К 2023–2025 гг. в некоторых точках уровни уменьшились практически до нуля (0,05–0,3 мг/л). Это, по всей вероятности, обусловлено устранением локальных очагов загрязнения: прекращением утечек топлива, завершением строительных работ, реконструкцией ливневой канализации. Что касается прибрежных скважин, здесь после разовых высоких выбросов (до ~6,4 мг/л в 2019 г.) концентрации опустились ниже 1 мг/л. Тем не менее сохраняется фоновое содержание в пределах 0,2–0,8 мг/л, которое связано с рассеянным дорожным стоком и накопленным загрязнением прошлых лет. Минимальные и наиболее стабильные значения характерны для парковых зон (порядка 0,05–0,1 мг/л), которые можно рассматривать как условно-фоновые для городской территории.

В целом максимальные уровни нефтепродуктов приходились на 2018–2019 гг., после чего в большинстве скважин прослеживается тенденция к снижению. Это может быть связано как с естественными процессами самоочищения подземных вод, так и с реализацией природоохранных мероприятий. Вместе с тем в отдельных точках сохраняются колебания и локальные всплески, а полное восстановление до фоновых значений (<0,1 мг/л) достигнуто не повсеместно; в ряде скважин концентрации к концу периода остаются на уровне 0,2–1 мг/л (2–10 ПДК).

В среднем за период 2018–2025 гг. суммарное снижение концентраций нефтепродуктов составило около 60–90% в центральных, жилых, транспортных и парковых зонах и порядка 35% в пойме реки, что указывает на общее сокращение техногенной нагрузки по углеводородам, особенно после 2020 г.

Формальный анализ временных рядов показал ограниченную применимость сложных моделей из-за малой длины и нерегулярности наблюдений. Автокорреляция выявлена лишь для отдельных рядов кальция, тогда как для аммония и нефтепродуктов временная структура носит прерывистый, эпизодический характер. Линейные трендовые модели лучше всего описывают динамику изменения концентраций нефтепродуктов (средний $R^2 \approx 0,4$), хуже — кальция и аммония.

Прогнозные оценки на 2026–2030 гг. показывают, что при сохранении текущих тенденций концентрации нефтепродуктов во многих скважинах могут приблизиться к ПДК уже к 2027–2028 гг., а в отдельных точках — к условному фону. Для аммония ожидается стабилизация на достигнутых уровнях, однако без обновления коммунальной инфраструктуры сохраняется риск новых локальных всплесков; при реализации защитных мер возможно снижение концентраций на 20–30% к концу прогнозного периода.

Рекомендации по управлению качеством подземных вод

Полученные результаты подтверждают выраженную пространственную неоднородность качества подземных вод волжско-альбского водоносного горизонта и очаговый характер загрязнения, обусловленный локальными техногенными источниками. Максимальные концентрации загрязняющих веществ приурочены к центральным и транспортно-

нагруженным зонам, минимальные — к парковым территориям; отсутствие пространственной автокорреляции указывает на локальный характер воздействия.

Аммоний является наиболее проблемным компонентом и в ряде скважин превышает санитарный норматив в 10—50 раз. Временная динамика характеризуется нерегулярными всплесками, типичными для утечек коммунально-бытовых сточных вод, с наибольшими и устойчивыми концентрациями в центральной части города. В периферийных и парковых зонах содержание аммония, как правило, остается низким, что отражает лучшую защищенность водоносного горизонта.

Нефтепродукты выявлены во всех скважинах, однако в 2018—2025 гг. зафиксировано их снижение на 65—88%, что, вероятно, связано со снижением техногенной нагрузки и процессами самоочищения. Тем не менее в большинстве точек концентрации остаются выше нормативных, а локальные всплески свидетельствуют о сохранении очаговых источников загрязнения.

Кальций отражает преимущественно природные гидрогеохимические условия и степень разбавления подземных вод: повышенные значения характерны для центральных районов, пониженные — для поймы и окраин. Сочетание низких концентраций Ca^{2+} с высокими концентрациями загрязнителей указывает на приток слабоминерализованных техногенно загрязненных вод.

Слабая корреляция между основными компонентами подтверждает разнородность источников загрязнения и необходимость дифференцированных мер управления. Прогноз показывает, что концентрации нефтепродуктов в ближайшие годы могут приблизиться к нормативным значениям, тогда как по аммоний в центральной части города без це-

ленаправленных мер сохраняется риск ухудшения качества подземных вод.

В целом подземные воды горизонта пригодны для технического использования, однако в значительной части скважин не соответствуют требованиям питьевого водоснабжения без очистки. Ключевым направлением улучшения их состояния является локализация и устранение источников загрязнения, прежде всего за счет модернизации коммунальной инфраструктуры и усиления мониторинга в наиболее уязвимых зонах.

Заключение

Исследование выявило, что качество вод волжско-альбского водоносного горизонта в условиях мегаполиса пространственно неоднородно, и определяется главным образом локальными техногенными факторами. Максимальное загрязнение сосредоточено в центре города и в зонах активного автотранспорта, а минимальное — на парковых и слабозастроенных территориях. Отсутствие пространственной автокорреляции показателей качества подземных вод указывает на очаговый характер источников загрязнения и определяет необходимость локализованного подхода к мониторингу и управлению.

Наиболее значимым загрязняющим компонентом является ион аммония, концентрации которого в ряде наблюдательных скважин многократно превышают санитарно-гигиенические нормативы. Основным источником аммонийного загрязнения выступают утечки из коммунальной инфраструктуры, прежде всего благодаря изношенным канализационным сетям. В центральных районах мегаполиса отмечается тенденция к накоплению аммония, тогда как на периферии зафиксировано снижение концентраций, вероятно, связанное с реализацией мероприятий по модернизации инженерных коммуникаций.

Нефтепродукты обнаружены повсеместно во всех точках опробования. Однако динамика за 2018 – 2025 гг. показывает устойчивое снижение концентраций на 65 – 88% благодаря переходу на более экологичный транспорт и модернизации городской инфраструктуры. Несмотря на положительные сдвиги, на 2025 г. в большинстве проб значения все еще превышают нормы, что диктует необходимость дальнейшего регулярно контроля.

Химический состав подземных вод на изучаемой территории формируется под действием разных механизмов. Ионы кальция в этом смысле в первую очередь маркируют природные гидрогеохимические процессы и степень разбавления техногенными и инфильтрационными водами. Так, повышенные концентрации Ca^{2+} в центральных районах говорят о распространении здесь более минерализованных вод, а пониженные – в пойменной и окраинных зонах – о поступлении более мягких вод. Слабые

корреляционные связи кальция с антропогенными компонентами служат дополнительным аргументом в пользу различия этих механизмов.

Прогнозные расчеты на 2026 г. предвещают дальнейшее снижение содержания нефтепродуктов и выход на плато показателей минерализации подземных вод. Вместе с тем для иона аммония в центре города, если не изменятся существующие условия, ожидается негативная динамика.

По данным на 2025 г. воды волжско-альбского горизонта можно отнести к категории удовлетворительных для технического применения, однако для питьевых целей они в целом ряде случаев не пригодны без дополнительной очистки. Следовательно, приоритетная задача – модернизация коммунальной инфраструктуры в центре мегаполиса и совершенствование системы мониторинга подземных вод для устойчивого улучшения их качества в среднесрочной перспективе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семячков А. И., Семячков К. А. Цифровая модель техногенеза подземных вод как элемент устойчивого развития городской среды // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 3. – С. 362 – 369. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-362-369.
2. Токарев С. В., Амеличев Г. Н., Амеличев Е. Г. Оценка уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению на основных массивах Горного Крыма с использованием региональной методики // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 1. – С. 397 – 409. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-397-409.
3. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В. Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 1. – С. 205 – 216. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.
4. Сарэу Н. Ю. Алгоритм снижения концентрации свинца в грунте и подземных водах на территории строительства объектов метрополитена с помощью биологических агентов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11. – С. 64 – 74. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_64.
5. Жуков С. А. Обоснование экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена с учетом гидрогеологического риска // Горные науки и технологии. – 2024. – Т. 9. – № 3. – С. 283 – 291. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-04-259.
6. Куликова Е. Ю., Розенталь О. М. Оценка гидрогеологического риска при строительстве и эксплуатации подземных сооружений метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 1. – С. 5 – 15. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_5.

7. Розенталь О., Крохин Г. Гидрохимическая динамика речного потока горной реки (на примере р. Катунь) // Экология и промышленность России. — 2025. — Т. 29. — № 1. — С. 59–65. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-1-59-65.

8. Левин Е., Шабанова С., Арстаналиев Е., Абишев М., Жантурин Ж., Сагитов Р., Василевская С., Дудоров В. Оценка соответствия ЛБР-технологии очистки сточных вод централизованных систем водоотведения поселений требованиям НДТ // Экология и промышленность России. — 2024. — Т. 28. — № 7. — С. 42–47. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-7-42-47.

9. Singh V., Srivastava R. K., Bhatt A. K. Groundwater Pollution / Battling Air and Water Pollution. Springer, Singapore. 2025. DOI: 10.1007/978-981-96-4375-2_10.

10. Majee U., Ghosh P., Filippelli G. M. Seasonal dynamics of groundwater pollution and health risks in municipal solid waste-affected urban settlements of Bengaluru, Kolkata and Durgapur, India // Environmental Geochemistry and Health. 2026, vol. 48, article 47. DOI: 10.1007/s10653-025-02928-5.

11. Parvin F., Shetu M. H., Tareq S. M., Ahmed S. M. Groundwater pollution in urban areas / Hydrology and Urban Water Supply. Water and Wastewater Management. Springer, Cham. 2024, pp. 123–135. DOI: 10.1007/978-3-031-72589-0_10.

12. Liu Y., Zhang Y., Lv H., Zhao L., Wang X., Yang Z., Li R., Chen W. Research on the traceability and treatment of nitrate pollution in groundwater: a comprehensive review // Environmental Geochemistry and Health. 2025, vol. 47, article 107. DOI: 10.1007/s10653-025-02412-0.

13. Li P., Wu J., He X., Wang Y., Ren X., Li L. Hydrochemistry and quality of groundwater / Water Resources Research in Northern Qinling Mountains, China. Springer Hydrogeology. Springer, Cham. 2026, pp. 119–139. DOI: 10.1007/978-3-032-09395-0_6.

14. Sarkar S., Patil S. A., Endait M. S. Assessment of physicochemical characteristics and groundwater pollution potential of urban landfill leachate / Pollution Control for Clean Environment, vol. 2. ICPCC 2023. Lecture Notes in Civil Engineering. 2025, vol. 416, pp. 387–395. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-97-7846-1_35.

15. Jiang H., Liu X., Bao H., Bi J., Lin T., He T. Intensive construction technology for urban underground parking shaft // Frontiers of Structural and Civil Engineering. 2024, vol. 18, pp. 1649–1662. DOI: 10.1007/s11709-024-1120-0.

16. Wan F., Li Q., Lan S., Zhang N., Li H., Qi Z. Research on the impact of tunnel construction on wetland groundwater level based on high-density electrical method / Proceedings of the 7th International Symposium on Water Resource and Environmental Management. WREM 2024. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham. 2025, pp. 369–378. DOI: 10.1007/978-3-031-88850-2_28.

17. Jiang H., Huang Z., Zhang H., Yang J. Analysis of the mechanical properties of central columns in the subway station in response to groundwater level rise // Urban Rail Transit. 2025, vol. 11, pp. 391–411. DOI: 10.1007/s40864-025-00253-9.

18. Zhou Z., Zhang D., Gao C., Li Zh., Guo Xu, Shang Ch., Wang P. Interaction analysis of subway construction and groundwater seepage in spring area using PD-FVM coupling method // Computational Particle Mechanics. 2025, vol. 12, pp. 1529–1547. DOI: 10.1007/s40571-024-00874-0.

19. Kapanski A. A., Hruntovich N. V., Klyuev R. V., Boltrushevich A. E., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Demin A. Y., Martyushev N. V. Intelligent methods of operational response to accidents in urban water supply systems based on LSTM neural network models // Smart Cities. 2025, vol. 8, no. 2, article 59. DOI: 10.3390/smartcities8020059.

20. Kapanski A. A., Hruntovich N. V., Klyuev R. V., Brigida V. S. Identification of easily accessible urban water consumption factors for energy-efficient management of pumping stations // Water Conservation Science and Engineering. 2025, vol. 10, no. 2, article 46. DOI: 10.1007/s41101-025-00372-1. **PLoS**

REFERENCES

1. Semyachkov Al. I., Semyachkov K. Al. Digital model of groundwater technogenesis as an element of sustainable development of the urban environment. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 362–369. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-362-369.

2. Tokarev S. V., Amelichev G. N., Amelichev Ye. G. Assessment of karst ground water vulnerability to contamination on the main massifs of the Mountain Crimea using regional methods. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 397–409. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-397-409.

3. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Comprehensive assessment of geoecological risks in conducting open and underground mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 205 – 216. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.
4. Sareu N. Yu. Algorithm of lead concentration reduction in soil and in groundwater on construction sites of subway facilities using biological agents. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 11, pp. 64 – 74. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_64.
5. Zhukov S. A. Substantiation of environmental safety in metro facility operations considering hydrogeological risks. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, vol. 9, no. 3, pp. 283 – 291. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-04-259.
6. Kulikova E. Yu., Rozental O. M. Assessment of hydrogeological risk during the construction and operation of underground subway facilities. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026, no. 1, pp. 5 – 15. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_5.
7. Rosenthal O., Krokhin G. Hydrochemical dynamics of river flow in a mountain river (Katun river as an example). *Ecology and Industry of Russia*. 2025, vol. 29, no. 1, pp. 59 – 65. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-1-59-65.
8. Levin E., Shabanova S., Arstanaliev E., Abishev M., Zhanturin Zh., Saghitov R., Vasilevskaia S., Dudorov V. Assessment of compliance of LBR technology for wastewater treatment of centralized discharge systems in settlements with the reference requirements. *Ecology and Industry of Russia*. 2024, vol. 28, no. 7, pp. 42 – 47. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-7-42-47.
9. Singh V., Srivastava R. K., Bhatt A. K. Groundwater Pollution. *Battling Air and Water Pollution*. Springer, Singapore. 2025. DOI: 10.1007/978-981-96-4375-2_10.
10. Majee U., Ghosh P., Filippelli G. M. Seasonal dynamics of groundwater pollution and health risks in municipal solid waste-affected urban settlements of Bengaluru, Kolkata and Durgapur, India. *Environmental Geochemistry and Health*. 2026, vol. 48, article 47. DOI: 10.1007/s10653-025-02928-5.
11. Parvin F., Shetu M. H., Tareq S. M., Ahmed S. M. Groundwater pollution in urban areas. *Hydrology and Urban Water Supply. Water and Wastewater Management*. Springer, Cham. 2024, pp. 123 – 135. DOI: 10.1007/978-3-031-72589-0_10.
12. Liu Y., Zhang Y., Lv H., Zhao L., Wang X., Yang Z., Li R., Chen W. Research on the traceability and treatment of nitrate pollution in groundwater: a comprehensive review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2025, vol. 47, article 107. DOI: 10.1007/s10653-025-02412-0.
13. Li P., Wu J., He X., Wang Y., Ren X., Li L. Hydrochemistry and quality of groundwater. *Water Resources Research in Northern Qinling Mountains, China*. Springer Hydrogeology. Springer, Cham. 2026, pp. 119 – 139. DOI: 10.1007/978-3-032-09395-0_6.
14. Sarkar S., Patil S. A., Endait M. S. Assessment of physicochemical characteristics and groundwater pollution potential of urban landfill leachate. *Pollution Control for Clean Environment*, vol. 2. ICPCCE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering. 2025, vol. 416, pp. 387 – 395. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-97-7846-1_35.
15. Jiang H., Liu X., Bao H., Bi J., Lin T., He T. Intensive construction technology for urban underground parking shaft. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2024, vol. 18, pp. 1649 – 1662. DOI: 10.1007/s11709-024-1120-0.
16. Wan F., Li Q., Lan S., Zhang N., Li H., Qi Z. Research on the impact of tunnel construction on wetland groundwater level based on high-density electrical method. *Proceedings of the 7th International Symposium on Water Resource and Environmental Management. WREM 2024. Environmental Science and Engineering*. Springer, Cham. 2025, pp. 369 – 378. DOI: 10.1007/978-3-031-88850-2_28.
17. Jiang H., Huang Z., Zhang H., Yang J. Analysis of the mechanical properties of central columns in the subway station in response to groundwater level rise. *Urban Rail Transit*. 2025, vol. 11, pp. 391 – 411. DOI: 10.1007/s40864-025-00253-9.
18. Zhou Z., Zhang D., Gao C., Li Zh., Guo Xu, Shang Ch., Wang P. Interaction analysis of subway construction and groundwater seepage in spring area using PD-FVM coupling method. *Computational Particle Mechanics*. 2025, vol. 12, pp. 1529 – 1547. DOI: 10.1007/s40571-024-00874-0.
19. Kapanski A. A., Hruntovich N. V., Klyuev R. V., Boltrushевич A. E., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Demin A. Y., Martyushev N. V. Intelligent methods of operational response to accidents in urban water supply systems based on LSTM neural network models. *Smart Cities*. 2025, vol. 8, no. 2, article 59. DOI: 10.3390/smartsities8020059.

20. Kapanski A. A., Hruntovich N. V., Klyuev R. V., Brigida V. S. Identification of easily accessible urban water consumption factors for energy-efficient management of pumping stations. *Water Conservation Science and Engineering*. 2025, vol. 10, no. 2, article 46. DOI: 10.1007/s41101-025-00372-1.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Дубов Никита Дмитриевич*¹ — аспирант,

e-mail: nikita_dubov.99@mail.ru,

ORCID ID: 0009-0000-0068-7920,

Scopus Author ID: 60437457600,

*Розенталь Олег Моисеевич*¹ — д-р техн. наук, профессор,

главный научный сотрудник, e-mail: omro3@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6261-6060,

Scopus Author ID: 57201976349, SPIN-код 4857-7570,

Куликова Елена Юрьевна — д-р техн. наук, профессор,

зав. кафедрой, МИРЭА — Российский технологический университет;

Национальный университет науки и технологий МИСИС,

e-mail: kulikova_ey@mirea.ru, ORCID ID: 0000-0002-9290-671X,

Scopus Author ID: 55827930100, SPIN-код 6674-6807,

¹ Институт водных проблем Российской академии наук.

Для контактов: Куликова Е.Ю., e-mail: kulikova_ey@mirea.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*N.D. Dubov*¹, Graduate Student,

e-mail: nikita_dubov.99@mail.ru,

ORCID ID: 0009-0000-0068-7920,

Scopus Author ID: 60437457600,

*O.M. Rozental*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Chief Researcher, e-mail: omro3@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6261-6060,

Scopus Author ID: 57201976349, SPIN-code 4857-7570,

E.Yu. Kulikova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Chair,

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia;

University of Science and Technology MISIS,

119049, Moscow, Russia, e-mail: kulikova_ey@mirea.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9290-671X,

Scopus Author ID: 55827930100, SPIN-code 6674-6807,

¹ Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Corresponding author: E.Yu. Kulikova, e-mail: kulikova_ey@mirea.ru.

Получена редакцией 05.04.2026; получена после рецензии 17.05.2026; принята к печати 10.07.2026.

Received by the editors 05.04.2026; received after the review 17.05.2026; accepted for printing 10.07.2026.

