

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ: РЕШЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ТЕПЛОСТАНСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ (ЮЗАО МОСКВЫ)

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

¹ Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

² РТУ МИРЭА, Москва, Россия, e-mail kulikova_ey@mirea.ru

³ НИТУ МИСИС, Москва, Россия

Аннотация: На примере Теплостанской возвышенности в юго-западной части Москвы, представляющей собой выраженную морфологическую структуру и естественный водораздел между бассейнами рек Сетуни, Очаковки и Москвы-реки, показано, что существующий объем экспериментальных исследований недостаточен для достоверного пространственно-временного анализа и прогноза качества подземных вод. В условиях высокой плотности застройки и дефицита свободных территорий подземное пространство мегаполиса активно используется для размещения транспортной инфраструктуры (метрополитен, тоннели), инженерных коммуникаций, коллекторов, подземных паркингов и складов. Такая многофункциональная эксплуатация нередко вступает в противоречие с сохранением естественного гидрогеологического режима, поскольку нарушает сложившиеся пути фильтрации, изменяет уровенный режим и может способствовать поступлению загрязнителей в водоносные горизонты. Предложена методика генерации синтетических данных (аугментация), учитывающая статистические особенности исходных временных рядов. Установлено, что при корректном выборе коэффициента расширения выборки аугментация позволяет надежно описывать как техногенные загрязнители (нефтепродукты), так и природные компоненты (кальций), обеспечивая возможность построения прогноза с доверительным интервалом. Показана возможность экстраполяции результатов на территорию округа с учетом морфологических и ландшафтных различий. Анализ выявил, что, несмотря на зафиксированное улучшение качества подземных вод в последние годы, сохраняется вероятность обратного тренда при усилении техногенной нагрузки и изменении климатических условий.

Ключевые слова: наблюдательная скважина, подземные воды, загрязняющие вещества, временной ряд, Теплостанская возвышенность, аугментация, гидрогеологическая информация, прогнозирование, вейвлет-преобразование.

Благодарность: Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0002 Государственного задания ИВП РАН.

Для цитирования: Дубов Н. Д., Куликова Е. Ю., Розенталь О. М. Анализ и прогнозирование качества подземных вод на урбанизированной территории: решения на примере Теплостанской возвышенности (ЮЗАО Москвы) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10-1. – С. 87–108. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_87.

Analysis and forecasting of groundwater quality in urbanized Areas: Solutions based on the Teplostanskaya upland (Southwestern Administrative District of Moscow)

N.D. Dubov¹, E.Yu. Kulikova^{2,3}, O.M. Rosenthal¹

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

² Russian Technical University MIREA, Moscow, Russia, e-mail kulikova_ey@mirea.ru

³ NUST MISIS, Moscow, Russia

Abstract: Using the example of the Teplostanskaya Upland in southwestern Moscow, which represents a distinct morphological structure and a natural watershed between the Setun, Ochkovka, and Moskva River basins, this paper demonstrates that the existing body of experimental research is insufficient for reliable spatiotemporal analysis and prediction of groundwater quality. Given the city's high development density and limited available space, its underground space is actively used for transport infrastructure (subways, tunnels), utilities, sewers, underground parking, and warehouses. This multifunctional use often conflicts with the preservation of the natural hydrogeological regime, as it disrupts established filtration pathways, alters the water level, and can facilitate the entry of pollutants into aquifers. This paper proposes a method for generating synthetic data (augmentation) that takes into account the statistical properties of the original time series. It was established that with an appropriate selection of the sample expansion coefficient, augmentation allows for the reliable description of both man-made pollutants (oil products) and natural components (calcium), enabling the construction of a forecast with a confidence interval. The possibility of extrapolating the results to the district's territory, taking into account morphological and landscape differences, was demonstrated. The analysis revealed that, despite the recorded improvement in groundwater quality in recent years, the likelihood of a reverse trend remains with increasing man-made loads and changing climatic conditions.

Key words: observation well, groundwater, pollutants, time series, Teplostanskaya Upland, augmentation, hydrogeological information, forecasting, prophet, wavelet transform.

Acknowledgements: The work has been done within the framework theme No. FMWZ-2025-0002 of the governmental assignment to RAS Institute of Water Problems

For citation: Dubov N. D., Kulikova E. Yu., Rosenthal O. M. Analysis and forecasting of groundwater quality in urbanized areas: Solutions based on the Teplostanskaya upland (Southwestern Administrative District of Moscow). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10-1):87-108. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_87.

Введение

При остром дефиците водных ресурсов, присущем урбанизированным территориям, подземные воды, несмотря на их значительный потенциал в обеспечении устойчивого водоснабжения, остаются недостаточно освоенным и изученным ресурсом.

Освоение подземного пространства в условиях уплотненной застройки затра-

гивает не только логистику, но и геологию. Размещение инфраструктуры метро, коллекторов и хранилищ видоизменяет фильтрационные потоки. Последствия — колебания уровней воды и потенциальное техногенное заражение подземных вод. Проблема требует учета гидродинамики на этапе проектирования.

Использование подземных вод в практике хозяйственно-питьевого водоснаб-

жения ограничено, в том числе из-за отсутствия надежной и репрезентативной информации об их составе, физико-химических свойствах, фильтрационно-емкостных характеристиках и динамике формирования.

Одна из ключевых причин такого положения заключается в слабой изученности подземных вод даже в пределах крупных мегаполисов, где, как правило, не создаются полноценные системы гидрогеологического мониторинга. Эта ситуация препятствует разработке схем рационального использования водных ресурсов, затрудняет прогноз оценки состояния подземных вод в пространстве и во времени, а также увеличивает вероятность принятия ошибочных управленческих решений [1–3]. Характерным примером такой ситуации служит Теплостанская возвышенность (ТВ) — крупная геоморфологическая структура, расположенная в пределах Юго-Западного административного округа Москвы (ЮЗАО). Территория площадью около 111 км² включает густонаселенные жилые районы и активно развивающиеся застроенные зоны, что создает значительное антропогенное воздействие на подземные воды.

ТВ представляет собой одну из наиболее выраженных геоморфологических структур юго-западной части Москвы. Ее морфологические особенности заключаются в наличии наибольших абсолютных высот рельефа в пределах городской черты, достигающих отметок 255 м над уровнем моря. В геологическом отношении ТВ сформирована чередующимися отложениями различного возраста — от четвертичных до меловых и юрских, залегающих на эродированной поверхности палеозойского фундамента [4]. Структурно-гидрогеологическую основу рассматриваемой территории составляет волжско-альбский водоносный горизонт, представленный

тонко- и мелкозернистыми песками, перемежающимися прослоями алевритов и глинистых отложений. Горизонт залегает на глубинах от 10 до 60 м и имеет мощность до 50 м. Абсолютные отметки кровли варьируются от 80 до 160 м. Подземные воды рассматриваемого горизонта характеризуются пресной минерализацией (до 0,5 г/л), гидрокарбонатно-кальциевым составом, положительным напором в диапазоне от 2 до 8 м и коэффициентами фильтрации от 0,002 до 1 м/сут, что свидетельствует о наличии значительной неоднородности водоносной толщи.

В пределах рассматриваемой территории общий поток подземных вод ориентирован преимущественно с юго-запада на северо-восток в направлении долины Москвы-реки. Такое направление определяется сочетанием регионального наклона поверхности кровли водоносного горизонта и гидродинамического градиента, сформированного под воздействием морфологии рельефа и антропогенной трансформации территории. Основные зоны разгрузки приурочены к пониженным элементам рельефа — долинам рек Сетуни и Очаковки, а также к эрозионно-расчлененным склонам, примыкающим к Воробьевым горам и природному парку Коломенское. На окраинах Теплостанской возвышенности, например в районе Воробьевых гор, водоносный горизонт залегает значительно ближе к земной поверхности, чем в центральных частях, таких как район станции метро «Теплый Стан». На таких участках, где водоупорные слои имеют небольшую мощность или нарушены, способность пород задерживать и фильтровать поступающие с поверхности загрязняющие вещества значительно снижается. В результате подземные воды становятся особенно уязвимыми для проникновения техногенных примесей, поступающих, напри-

мер, с поверхностным стоком, из утечек инженерных коммуникаций или в результате производственной деятельности [5, 6].

Пространственно-географические особенности размещения скважин и факторы формирования качества подземных вод

Для анализа текущего состояния и прогнозирования изменения качества подземных вод рассматриваемой территории использовались данные наблюдений, полученные от Государственного природоохранного бюджетного учреждения «Мосэкомониторинг». В выборку были включены 9 наблюдательных скважин, размещенных по периферии и в пределах тела Теплостанской возвышенности (рис. 1).

Сеть охватывает основные морфологические элементы юго-западной части

Москвы и включает участки как интенсивной застройки, так и природных территорий. Возвышенность выполняет роль водораздела между бассейнами рек Сетуни, Очаковки и Москвы-реки, а геоморфологическая структура территории определяет соотношение зон питания и разгрузки водоносных горизонтов.

Кровля волжско-альбского горизонта залегает на глубинах от 10 до 60 м при абсолютных отметках поверхности от 120 м в долинах рек до 250 м на водоразделах.

Разница в отметках рельефа Теплостанской возвышенности определяет неодинаковые гидродинамические режимы. В центре, под мощной суглинисто-глинистой толщей, доминирует инфильтрационное питание. На склонах и в долинах, напротив, происходит разгрузка водоносного горизонта, и там он сильнее подвержен техногенным нагрузкам.

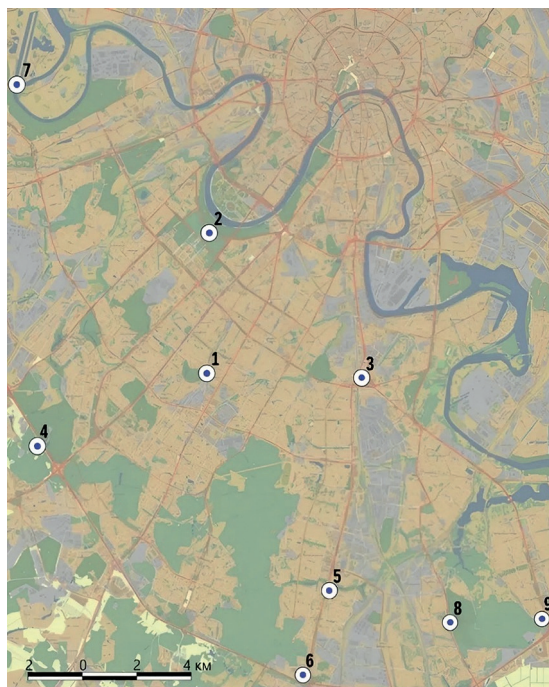


Рис. 1. Рассредоточение скважин в изучаемом районе
Fig. 1. Distribution of wells in the study area

Для районов Теплый Стан, Коньково и Юго-Западный характерны следующие параметры: кровля волжско-альбского горизонта вскрывается на глубинах 50–60 м при высотных отметках 240–255 м. Эти участки считаются областями питания — осадки и талые воды фильтруются через покровные суглинки. Однако элементы городской застройки — дорожные полотна, техногенно нарушенные почвы, инженерные сети и зоны усиленного дренажа ливневок — создают предпосылки для миграции растворенных поллютантов. Среди них — углеводороды и ионы кальция, источником которых служат строительные материалы и техногенные отложения.

В результате даже в пределах зон питания фиксируется повышенный техногенный фон, проявляющийся в локальных пиках концентраций нефтепродуктов в инфильтрационных потоках.

К северо-востоку, по направлению к Ленинскому и Гагаринскому районам, глубина залегания горизонта постепенно уменьшается до 20–30 м, а в районе Воробьевых гор и Лужников он подходит к поверхности на глубинах 10–15 м, переходя в зоны активной разгрузки в пойменные аллювиальные пески Москвы-реки.

Западные и юго-западные склоны (Тропарево-Никулино, Очаково-Матвеевское) характеризуются сочетанием дренирующих и разгрузочных участков, где водоносный горизонт дренируется долиной реки Сетуни. На восточных и юго-восточных склонах (Нагорный, Чертаново) гидродинамические условия осложняются высокой плотностью застройки и транспортной инфраструктуры, что повышает вероятность локальных загрязнений при инфильтрационном питании. В долинных понижениях, приуроченных к поймам Сетуни, Очаковки и Москвы-реки, где абсолютные отметки поверхности снижаются до 120–140 м,

водоносный горизонт вскрывается на глубинах 10–20 м и характеризуется максимальной уязвимостью из-за малой мощности водоупорных толщ и прямого гидравлического контакта с поверхностными водами.

На топографических и гидрогеологических картах Москвы Теплостанская возвышенность представлена как протяженный северо-восточный водораздел, вытянутый от районов Теплого Стана и Ясенево к Воробьевым горам. Линии подземного стока ориентированы преимущественно с юго-запада на северо-восток и сходятся в направлении долины Москвы-реки. В западных частях потоки направлены к долине Сетуни, в восточных — к бассейну Очаковки, в северных — к пойме Москвы-реки. Такое строение определяет четко выраженный градиент гидрогеохимических параметров: максимальные концентрации нефтепродуктов наблюдаются в зонах схождения подземных потоков у подошв склонов, а минимальные — на водоразделах с активным инфильтрационным питанием [7–9].

Наблюдательные скважины фиксируют пространственную дифференциацию состава подземных вод. В районе Воронцовского парка (210–220 м, глубина ≈ 35 м) воды содержат повышенные концентрации нефтепродуктов (в среднем 1,2 мг/л) и кальция (до 333 мг/л). Все концентрации веществ измеряются в мг/л. На Воробьевых горах (160–180 м, ≈ 20 м) отмечаются нефтепродукты 1,1–1,5 мг/л при пониженных значениях кальция 13–25 мг/л, что связано с разгрузкой подземных вод в долину Москвы-реки. В Нагорном районе (180–190 м, ≈ 25 м) при высокой транспортной нагрузке концентрации нефтепродуктов достигают 8 мг/л при низких значениях кальция 4–31 мг/л. В районе Говорова у МКАД (отметка 200–210 м, глубина ≈ 40 м) наблюда-

ется пространственная мозаичность химического состава подземных вод, выражающаяся в чередовании участков с повышенными и пониженными концентрациями нефтепродуктов (0,05–0,3 мг/л) и кальция (15–31 мг/л). В Чертанове Центральном (180–200 м, ≈ 35 м) нефтепродукты 0,2–1,7 мг/л, кальций 94–130 мг/л; в Чертанове Южном (170–180 м, ≈ 45 м) нефтепродукты до 2,5 мг/л, кальций 54–70 мг/л. В пойме Москвы-реки в Крылатском (130–140 м, ≈ 15 м) нефтепродукты составляют 0,2–0,6 мг/л, кальций 60–80 мг/л. В Бирюлевском лесопарке на западе (180–190 м, ≈ 30 м) при слабой урбанизации нефтепродукты минимальны – 0,1–0,26 мг/л, при кальции 12–50 мг/л; в восточной части парка у МКАД (170–180 м, ≈ 35 м) под влиянием транспортных потоков нефтепродукты повышаются до 0,4 мг/л при кальции 80–90 мг/л.

Освоение подземного пространства как фактор техногенной трансформации гидрогеологических условий

Помимо поверхностного загрязнения, существенное влияние на качество подземных вод Теплостанской возвышенности оказывает освоение подземного пространства, характерное для урбанизированных районов ЮЗАО. В пределах рассматриваемой территории проложены линии метрополитена (Калужско-Рижская, Сокольническая, Большая кольцевая линии), глубокие коллекторы дождевой и бытовой канализации, подземные пешеходные переходы и автостоянки, а также многоуровневые подземные части жилых и общественных зданий. Эти сооружения, проникая в толщу четвертичных и меловых отложений, нарушают естественную гидродинамическую структуру волжско-альбского водоносного горизонта [10].

При строительстве тоннелей и котлованов происходит вскрытие водоносных слоев, что приводит к локальным понижениям уровня подземных вод и изменению направления градиентов потока. В зонах водопонижения усиливается инфильтрация поверхностных вод, обогащенных техногенными примесями, что подтверждается повышенными концентрациями нефтепродуктов в скважинах, расположенных вблизи крупных транспортных узлов (например, в Ногинском районе, где значения достигают 8 мг/л). С другой стороны, заглубленные фундаменты и противофильтрационные завесы, устраиваемые при строительстве подземных комплексов, создают искусственные барьеры, перераспределяющие поток и задерживающие миграцию загрязнителей [11]. За подпорными стенками, где движение воды замедляется, образуются застойные зоны – и в них, как ни странно, концентрации кальция и нефтепродуктов оказываются ниже обычных. Это парадокс, но он хорошо известен гидрогеологам.

Гораздо большее влияние на качество воды оказывают коллекторы и дренажи. Они не просто отводят подземный поток, а становятся проводниками для растворенных примесей. Судя по данным ГПБУ «Мосэкомониторинг» и эксплуатационным отчетам по подземным сооружениям, в местах, где коммуникационные тоннели пересекают водоносный горизонт (Коньково, Теплый Стан и Чертаново), регулярно фиксируют аномалии хлоридов, сульфатов и железа. Причина – коррозия бетона и микроутечки технических жидкостей. Например, на участке Бутовской линии метро, который проходит через южную часть Теплостанской возвышенности, среднегодовой уровень нефтепродуктов в воде оказывается на 15–20% выше фонового, а общая минерализация при этом тоже растет.

Следовательно, подземное строительство — это не пассивный фон, а полноценный фактор, который формирует химический состав грунтовых вод. Если не учитывать его в гидрогеологических моделях, риски загрязнения неизбежно занижаются, а оценка ресурсов становится неточной. Предложенная нами методика аугментации временных рядов как раз позволяет обойти это ограничение: она закладывает в модель пространственные неоднородности и искусственно генерируемые аномалии, тем самым косвенно отражая последствия строительства.

Химический состав подземных вод округов Москвы

Данные «Мосэкомониторинга» и ежегодных докладов за 2019–2022 гг. показывают: те же проблемы, что на юго-западе, характерны и для остального города, но с поправкой на рельеф.

Западный округ — районы Кунцево, Фили-Давыдково, Очаково-Матвеевское — пока еще держится в рамках нормы. Волжско-альбский горизонт там сохраняет привычный пресный гидрокарбонатно-кальциевый облик, и загрязнение скорее фоновое. Содержание нефтепродуктов в пределах 0,2–0,6 мг/л, кальция — 60–120 мг/л.

Наибольший интерес представляет восточная часть Москвы, представленная равниной, поверх которой находятся мощные глинистые отложения. Вода фильтруется медленно, загрязнению труднее пробиться вглубь. И химический состав воды это подтверждает: она гораздо однороднее. Содержание нефтепродуктов не превышает 0,3 мг/л, кальция — 60–90 мг/л. По сути, прослеживается прямая зависимость: чем надежнее поверхность изолирована от горизонта, тем слабее антропогенный след. В пределах Северного административного округа, приуроченного к долине

р. Яузы и участкам плотной городской застройки, техногенная нагрузка значительно выше. По данным наблюдательной сети Мосэкомониторинга, здесь фиксируются максимальные значения нефтепродуктов — до 1 мг/л, при умеренном содержании кальция — 40–70 мг/л. Повышенные концентрации углеводородов в подземных водах северной Москвы связаны с воздействием автотранспортных узлов и инженерных коммуникаций, а также с малой глубиной залегания грунтовых горизонтов в пойме Яузы.

Различия в химическом составе подземных вод Теплостанской возвышенности и соседних административных округов Москвы отражают пространственную структуру гидрохимического поля, формируемую сочетанием морфологических, литологических и антропогенных факторов. На участках с преобладанием инфильтрационного питания, приуроченных к водораздельным поверхностям, сохраняются относительно устойчивые концентрации природных компонентов, тогда как в долинных и эрозионных понижениях, где происходят разгрузка и дренирование горизонта, фиксируются повышенные значения нефтепродуктов и возросшая изменчивость химического состава. Такое соотношение зон питания и разгрузки определяет направленность миграции веществ и степень уязвимости водоносного горизонта в пределах урбанизированной морфоструктуры [12].

Гидрогеохимический режим рассматриваемой территории, наряду с морфологическими и техногенными особенностями, контролируется и климатическими факторами, определяющими интенсивность инфильтрации и поверхностного стока. Для выявления временной изменчивости состава подземных вод проанализированы наблюдения за 2018–2023 гг. по концентрациям нефтепро-

дуктов и кальция. Полученные ряды характеризуются выраженной сезонной изменчивостью, отражающей отклик гидрогеологических систем на колебания увлажненности и температурного режима.

В 2020 г., когда количество осадков в июне–июле превысило климатическую норму (до 170–190 мм по данным станций ВДНХ и МГУ), усилились процессы поверхностного и инфильтрационного стока, сопровождавшиеся ростом концентраций нефтепродуктов. В более сухом 2021 г. поступление загрязняющих веществ уменьшилось, а содержание кальция увеличилось до 110–130 мг/л вследствие испарительного концентрирования и активизации внутрипластового водообмена. Эти противоположные тенденции подтверждают зависимость гидрохимического режима от климатических флуктуаций и геоморфологического положения участков [13].

Общее количество наблюдений за 6 лет составило 10–12 измерений по каждой скважине.

Разброс данных оказался высоким: коэффициент вариации по ряду показателей превышает 33%. Это не случайность — так проявляются естественная неоднородность городской среды и сложная структура подземных потоков. Но проблема в том, что имеющейся выборки явно недостаточно для точных пространственно-временных выводов. Чтобы повысить надежность анализа и прогнозов для Теплостанской возвышенности и прилегающих районов, требуется расширять исходный массив данных — либо за счет новых замеров, либо с помощью методов статистического дообучения и численной аугментации.

За последние 6 лет на каждой скважине отобрано по 10–12 проб по основным контролируемым компонентам. Для обычного мониторинга этого

хватило бы, но при таком разбросе значений (вариация выше 33% [14]) объем наблюдений приходится наращивать в разы — иначе любые прогнозы будут неточными.

Существующий объем информации не позволяет обеспечить регулярное и полноценное проведение мониторинга, необходимое для надежной охраны подземных вод и выработки эффективных мероприятий по их рациональному использованию. Ограниченная достоверность исходных данных повышает вероятность некорректной интерпретации гидрогеологических условий, что влечет за собой риск принятия решений, которые могут оказаться технически неоправданными, экономически затратными или экологически небезопасными. Подобные просчеты возможны как на уровне проектирования и эксплуатации инженерных систем водоснабжения и водоотведения, так и на уровне разработки и реализации управленческих мер в сфере регулирования и контроля водопользования [15, 16].

В условиях отсутствия планов по масштабной модернизации или расширению действующей системы гидрогеологического наблюдения в работе обоснована необходимость разработки альтернативных подходов. В частности, предлагается методика преобразования неполных или «урезанных» рядов наблюдений в статистически релевантную форму посредством процедур аугментации — генерации синтетических данных, позволяющих учесть как индивидуальные особенности распределений, так и общие закономерности динамики загрязняющих веществ [17].

Актуальной задачей становится также повышение чувствительности применяемых моделей к единичным выбросам и аномалиям, поскольку именно они нередко являются индикаторами нарушений техногенного происхождения.

В условиях редкой и нерегулярной регистрации таких событий традиционные методы сглаживания могут приводить к потере критически важной информации. Поэтому применение аугментации в сочетании с методами анализа трендов, пиковых значений и сезонных колебаний приобретает особую значимость.

Аугментация временных рядов состава и свойств грунтовой воды ЮЗАО Москвы

Пространственная неоднородность химического состава подземных вод в пределах ТВ, обусловленная сочетанием морфологических и антропогенных факторов, сочетается с высокой временной изменчивостью. Для корректного анализа таких систем необходимо увеличение объема наблюдений, однако действующая сеть мониторинга подземных вод Москвы имеет ограниченные пространственно-временные данные. Скважины распределены неравномерно и обследуются, как правило, дважды в год, что не позволяет в полной мере проследить межсезонные и сезонные изменения. В условиях урбанизированных территорий, где подземный сток зависит от микрорельефа, плотности застройки и конфигурации водоразделов, подобная неполнота данных затрудняет интерпретацию наблюдений.

Чтобы обойти ограниченность выборки, применена методика аугментации временных рядов. Суть ее в том, что исходные данные дополняются синтетическими точками, которые моделируют реальную изменчивость — и природную, и техногенную. При этом синтетика строится на основе ретроспективного ряда, включая те самые единичные выбросы, которые типичны для городских гидрогеологических наблюдений.

Под выбросом здесь понимаются те значения, которые заметно отклоняются от фонового коридора, но при этом не

разрывают связи с основным трендом. На местности такие аномалии обычно привязаны к конкретным очагам: участки дорог с усиленным стоком, ливневые коллекторы, техногенные западины, а также зоны, где меняется гидродинамика внутри той или иной морфоструктуры. Аугментация как раз и позволяет корректно «вписать» эти локальные всплески в общую картину.

Включая аномальные точки в аугментированную выборку, мы сохраняем реальную внутриплощадочную вариативность — и синтетические данные становятся куда более правдоподобными. Если же эти выбросы проигнорировать, модель неизбежно сгладит пространственные флуктуации и потеряет чувствительность к критическим изменениям. Поэтому аугментация дает наилучший результат только после предварительной чистки данных: нужно отсеять грубые ошибки отбора проб и сезонные колебания уровня воды. Тогда модель становится статистически устойчивой, но при этом не теряет естественной изменчивости химического состава.

Для уточнения и усовершенствования выборки мы использовали метод симметричного среднего процента отклонения — он позволяет добавлять синтетические точки, не нарушая исходного распределения.

$$SMAPE = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} |C_n - C_n^b|}{\sum_{n=0}^{N-1} (|C_n| + |C_n^b|) / 2} \quad (1)$$

где C_n — истинные значения целевой переменной; C_n^b — модельные данные; n — индекс измерения; N — количество измерений в выборке.

SMAPE — это как раз тот показатель, который позволяет сравнивать реальные и аугментированные ряды без «перекося» в сторону больших или малых зна-

чений. Для неоднородных по пространству объектов это свойство критично. В отличие от традиционных метрик вроде MAE или RMSE, симметричное среднее процента отклонения не дает модели переоценивать одни параметры и недооценивать другие. Это особенно важно, когда речь идет о концентрациях загрязнителей в условиях резких географических контрастов — от водоразделов до пойменных зон, где воды разгружаются.

Мы опробовали методику на одной из скважин — расширили ряд концентраций нефтепродуктов в 6 раз ($p = 6$) (рис. 2). В результате погрешность оценки статистических характеристик сократилась примерно в $\sqrt{p} \approx 2,5$ раза. Синтетические данные при этом сохранили все характерные изгибы и перегибы исходного тренда шестого порядка — а значит, мы не потеряли локальные особенности распределения загрязнения, которые диктуются сложным рельефом и застройкой.

Исследователи [18, 19] подтверждают: аугментация дает модели не просто больше цифр, а своего рода «тренировочный полигон» для нестандартных ситуаций. Синтетические данные расширяют горизонт возможных значений и учат модель видеть закономерности, которые в исходной выборке встречаются редко или вообще отсутствуют. Так модель перестает быть заложницей конкретных замеров и начинает увереннее справляться с новыми данными — а в гидрогеологии города это крайне важно.

Такой подход позволяет не ограничиваться воспроизведением известных данных, а адекватно реагировать на новые условия, включая редкие сочетания параметров. Расширение объема исходной выборки за счет реалистичных синтетических наблюдений снижает риск переобучения, при котором модель чрезмерно подстраивается под обучающие примеры и утрачивает способность выявлять общие зависимости. Особенно это важно при работе с ограниченными

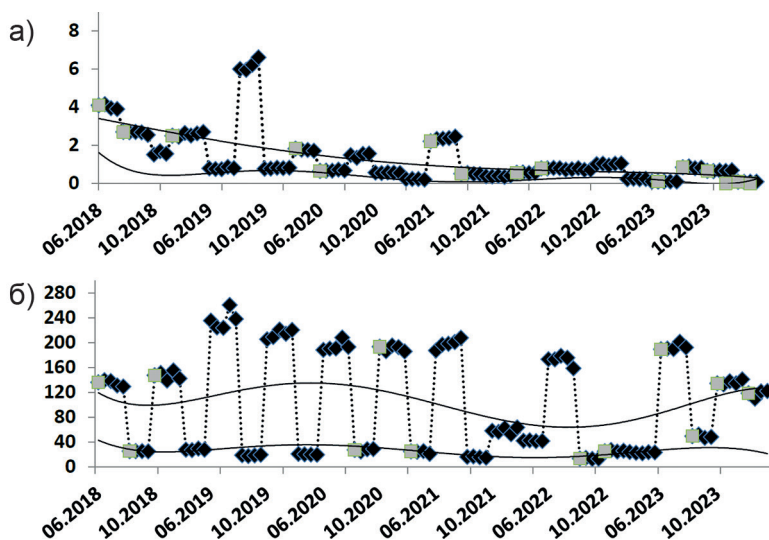


Рис. 2. Концентрации нефтепродуктов (а) и кальция (б), мг/л: фактические данные (серые маркеры) и тенденция их изменения (волнистая нижняя линия), а также аугментированные данные (черные маркеры) и тенденция их изменения (волнистая верхняя линия)

Fig. 2. Concentrations of petroleum products (a) and calcium (b), mg/l: actual data (gray markers) and their trend (wavy lower line), as well as augmented data (black markers) and their trend (wavy upper line)

объемами гидрогеологической информации.

Прогноз состава грунтовой воды на скважинах ЮЗАО с использованием аугментации

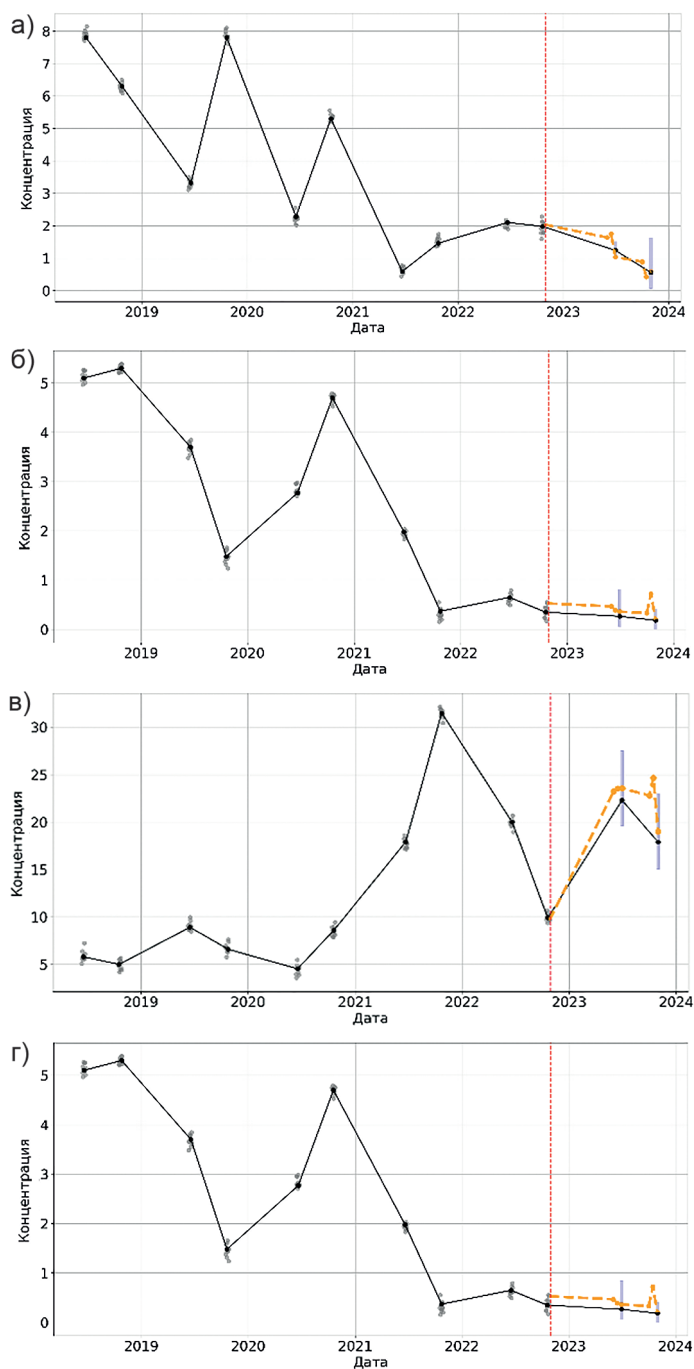
Для демонстрации предлагаемой методики был выполнен прогноз состава и свойств воды волжско-альбского терригенного комплекса на территории Теплостанской возвышенности ЮЗАО Москвы. Расчеты выполнялись с целью проверки применимости метода аугментации для конкретных временных рядов. В исследование включены две наблюдательные скважины, разнотипные по географическому положению и гидрогеологическим условиям. Скважина № 3 расположена в Нагорном районе, на юго-восточном склоне Теплостанской возвышенности, в зоне интенсивной застройки и высокой транспортной нагрузки. Здесь кровля горизонта находится на глубине около 25 м, а поверхностный сток с покрытых асфальтом площадей способствует инфильтрации техногенных примесей. Скважина № 7 находится в Крылатском, в гипорейной зоне, прилегающей к долине Москвы-реки, где водоносный горизонт вскрывается на глубине 10–15 м и гидравлически связан с аллювиальными песками. Такое соотношение площадок позволяет сопоставить поведение загрязняющих веществ в пределах контрастных морфологических элементов — водораздельного и пойменного.

Исходные временные ряды состояли из 12 членов, полученных путем 2-кратного, летнего и осеннего, измерения в 2018–2023 гг. для концентрации заведомо антропогенного компонента (нефтепродукты) и преимущественно природного (кальций). Набор данных был увеличен в 6 раз с помощью аугментации, чтобы общий ряд соответствовал гипотетическому режиму ежемесячных

исследований. Такой подход позволил восполнить недостающую информацию и ввести в модель элементы сезонности, которые невозможно отразить при использовании редких измерений. Для прогнозирования использовали библиотеку Prophet, на основе метода моделирования распределения вероятностей MCMC (Markov chain Monte Carlo) [19, 20].

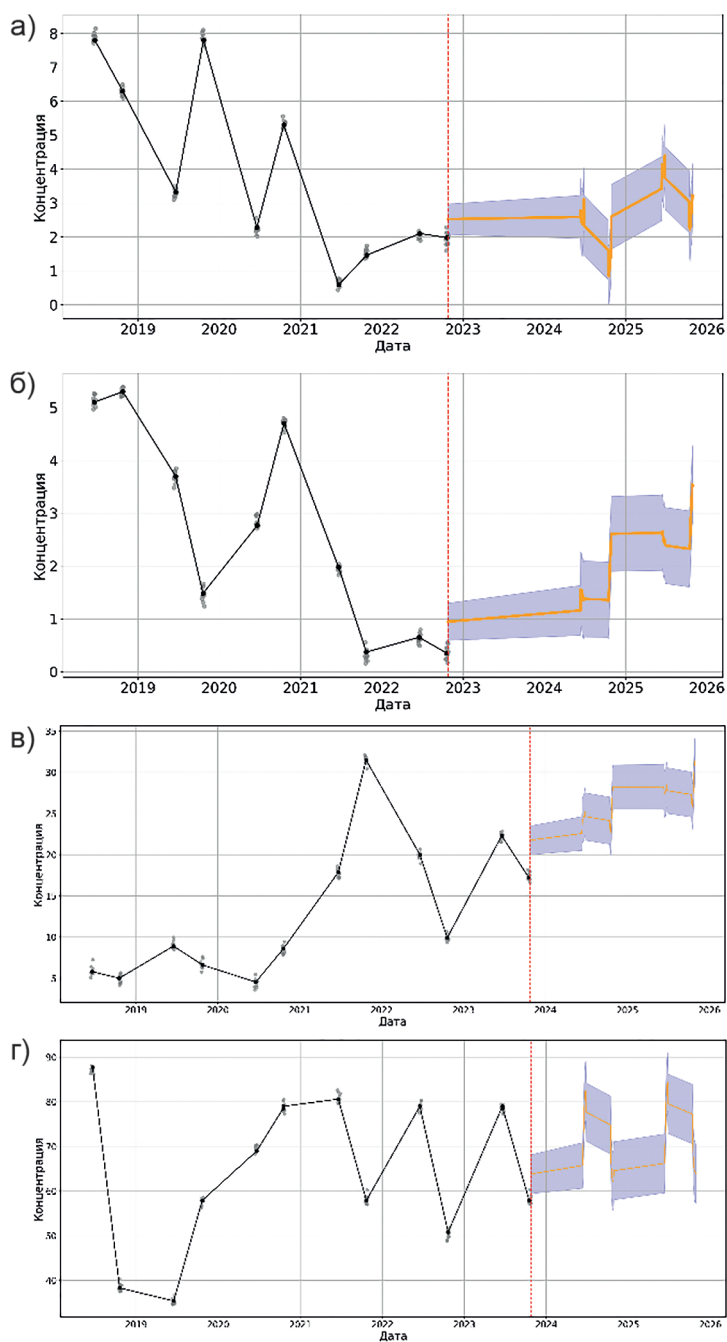
Для оценки качества предиктивной модели и ее работоспособности выполнялась валидация прогноза на 2023 г. с использованием аугментированных данных за 2018–2022 гг. Результат (рис. 3) показал удовлетворительное совпадение предсказанных данных с историческими значениями. Это позволило осуществить прогноз на будущий период времени (см. рис. 4).

Из рис. 4 видно, что увеличение срока прогнозирования сопровождается расширением доверительного интервала, повышающим неопределенность информации. Данный результат является следствием накопления вероятностных ошибок при продвижении по временной шкале и снижением точности ввиду невозможности учета всех факторов внешнего воздействия. Тем не менее, модель сохраняет предсказуемость в пределах допустимого диапазона и с вероятностью 0,95 пользователь исторической гидрогеологической информации после ее аугментации может быть уверен, что контролируемые показатели сохраняются в установленных границах. В частности, из рис. 4, а, б с указанной вероятностью может быть сделан вывод о возможном повышении концентрации нефтепродуктов на скважине № 3 по сравнению с № 7, а в соответствии с рис. 4, в, г — о пониженной концентрации кальция, что, очевидно, зависит от указанной выше локализации точек наблюдения. Такие различия могут быть обусловлены как гидродинамическими



черная линия – исходные значения; оранжевая – прогноз; красная штриховая – граница между исходными и прогнозными данными; синие линии – доверительные интервалы

Рис. 3. Концентрация (мг/л) нефтепродуктов (а, б) и кальция (в, г) по скважинам № 3 (а, в) и № 7 (б, г)
 Fig. 3. Concentration (mg/l) of petroleum products (a, b) and calcium (v, g) in wells No. 3 (a, v) and No. 7 (b, g)



заливка – доверительный интервал прогнозирования; черная линия – исходные значения;
 оранжевая – прогноз; красная штриховая – граница между исходными и прогнозными данными;
 синие линии – доверительные интервалы

Рис. 4. Прогнозирование состава воды на 2024, 2025 г.

Fig. 4. Water composition forecast for 2024 and 2025

особенностями конкретных участков, так и антропогенными факторами, включая близость к транспортной инфраструктуре, строительным зонам или промышленным объектам.

В то же время, несмотря на зафиксированное в 2023 г. некоторое снижение содержания этих веществ в воде, их концентрация, и прежде всего нефтепродуктов, к 2027 г. может повыситься при сохранении на территории природных и антропогенных условий.

Определение возможности статистического прогноза состава и свойств подземных вод по ЮЗАО в целом

Данная проблема может представлять интерес для водохозяйственной политики административного округа как единицы, осуществляющей собственную

исполнительно-распорядительную, координирующую и контрольную деятельность.

В геоструктурном отношении территория Юго-Западного административного округа располагается на юго-западной окраине Московской синеклизы и частично примыкает к переходной зоне в сторону Мещерской низменности. Такое положение определяет сложное сочетание погребенных морфологических форм, неравномерную мощность покровных суглинков и песков, а также варьирующую степень защищенности волжско-альбского водоносного горизонта от поверхностных воздействий.

Анализ состава и свойств подземных вод выявил, что контролируемые показатели изменяются во времени по схожей траектории, если исключить влияние случайных колебаний. Это указывает

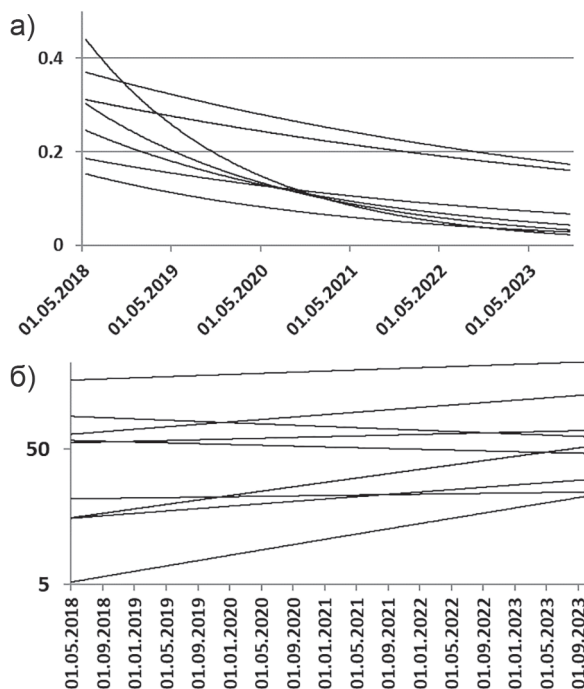


Рис. 5. Полученные по результатам измерений в 2018–2024 гг. тренды концентрации нефтепродуктов, мг/л (а) и кальция, мг/л (б, масштаб логарифмический)

Fig. 5. Trends in the concentration of petroleum products, mg/l (a) and calcium, mg/l (b, logarithmic scale) obtained from measurements in 2018–2024

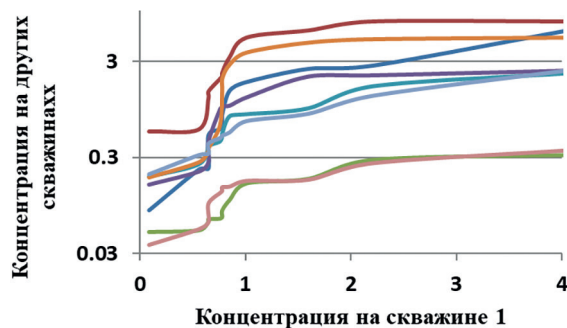


Рис. 6. Q-Q графики концентрации нефтепродуктов (мг/л) в 2018–2023 гг. и их линейная аппроксимация в логарифмической шкале ординат (прямые линии). Примечание: достоверность аппроксимации данных, полученных на скважине № 1 и скважинах № 2 – 0,96; № 3 – 0,72; № 4 – 0,86; № 5 – 0,73; № 6 – 0,94; № 7 – 0,65; № 8 – 0,99; № 9 – 0,90

Fig. 6. Q-Q plots of petroleum product concentration (mg/l) in 2018–2023 and their linear approximation on a logarithmic scale (straight lines). Note: the accuracy of the approximation of the data obtained at well No. 1 and wells No. 2 is 0.96; No. 3 is 0.72; No. 4 is 0.86; No. 5 is 0.73; No. 6 is 0.94; No. 7 is 0.65; No. 8 is 0.99; No. 9 is 0.90

на наличие устойчивых пространственно-временных закономерностей, формируемых региональными гидрогеологическими процессами, которые задают общее направление изменений и позволяют обоснованно интегрировать данные из разных наблюдательных точек в единую статистическую выборку. Характерным примером служат выявленные тренды 6-й степени для концентрации

нефтепродуктов (рис. 5, а); для природных компонентов, таких как кальций, аналогичные тенденции выражены слабее (рис. 5, б).

Можно предположить, что индивидуальные отличия в данном случае обусловлены особенностями строения вмещающего кальциево-гидрокарбонатно-хлоридные воды терригенного комплекса, сформированного из карбонатно-терри-

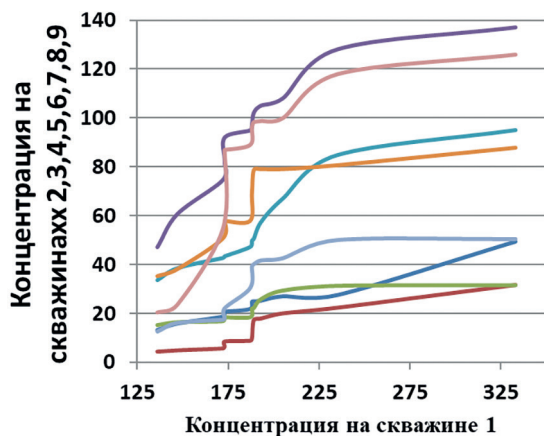


Рис. 7. Q-Q графики концентрации кальция (мг/л), обозначения — как на рис. 6. Примечание: достоверность аппроксимации данных, полученных на скважине № 1 и скважинах № 2 – 0,68; № 3 – 0,83; № 4 – 0,86; № 5 – 0,76; № 6 – 0,87; № 7 – 0,60; № 8 – 0,61; № 9 – 0,58

Fig. 7. Q-Q plots of calcium concentration (mg/l), labels as in Fig. 6. Note: the reliability of the approximation of the data obtained at well No. 1 and wells No. 2 is 0.68; No. 3 is 0.83; No. 4 is 0.86; No. 5 is 0.76; No. 6 is 0.87; No. 7 is 0.60; No. 8 is 0.61; No. 9 is 0.58

генных пород и слабо водопроницаемых глинистых пластов.

Использование же для исследования объединенных временных рядов в этом случае корректно при условии их сопоставимости, проверку которой выполняли с помощью квантильных диаграмм (Q-Q plot) [14].

На рис. 6 и 7 приведены типичные результаты сопоставления данных по нефтепродуктам и кальцию на скважинах с условным номером 1 и на остальных восьми. Как видно, аппроксимация данных здесь высока. Совпадение эмпирических квантилей подтверждает схожесть распределений, что создает возможность агрегирования данных в рамках единой модели прогнозирования.

Кроме того, выявленная линейность на диаграммах Q-Q указывает на отсутствие значимых смещений, что особенно важно при анализе загрязняющих веществ, чувствительных к локальным источникам.

Другие сопоставления также указывают на высокий коэффициент аппроксимации: для нефтепродуктов он превышает 0,8, а для кальция — 0,6. Это позволяет осуществить интеграцию данных путем частотно-временного объединения экспериментальных результатов с увеличением их количества сначала в 9 раз — по числу скважин, затем еще в 6 раз — посредством аугментации.

Появляется выборка из $12 \times 9 \times 6 = 648$ наблюдений, допускающая возможность выбора метода прогнозирования с удовлетворительной достоверностью результата.

Прогноз состава и свойств грунтовой воды по ЮЗАО

Использовалось сочетание взаимно дополняющих друг друга методов прогнозирования с помощью Prophet и вейвлетного преобразования [20]. При оценке состава и свойств подземных вод с

помощью Prophet выявляются временные последовательности, с помощью вейвлет-преобразования — частотные, а в сочетании с интегрированной моделью авторегрессии/скользящего среднего ARIMA — также и скрытые шумовые компоненты [6, 9]. Достигается комплексный охват динамических характеристик исследуемых показателей, что повышает надежность и интерпретируемость полученных прогнозов. Особенность данного подхода заключается в способности учитывать как долгосрочные тренды, так и краткосрочные колебания, часто остающиеся за пределами простых регрессионных моделей.

Вейвлет-преобразование базировалось на дискретном вейвлет-преобразовании (DWT) второго уровня и вейвлета Добеши четвертого порядка, встроенного в ядро систем компьютерной математики Mathcad (DB4) [18]. Это позволило разделить временной ряд на компоненты, соответствующие различным частотным диапазонам: высокочастотные (отражающие локальные колебания, пики, шумы) и низкочастотные (описывающие долгосрочные, более устойчивые тенденции). Прогноз строился на основании примененной к последней компоненте ARIMA (2,1,2), где первая цифра в скобках — порядок авторегрессии, вторая — порядок интегрирования, последняя — порядок скользящего среднего [13].

Такое сочетание методов позволило исключить шумовые эффекты, часто возникающие в наблюдательных данных, и сфокусировать модель на устойчивых геохимических закономерностях, связанных с особенностями геоморфологии округа. Для возвышенных участков (районы Теплого Стана и Конькова) характерны плавные тренды и выраженные сезонные колебания, тогда как в долинных зонах (Воробьевы горы, Крылатское) отмечаются резкие пики концентраций,

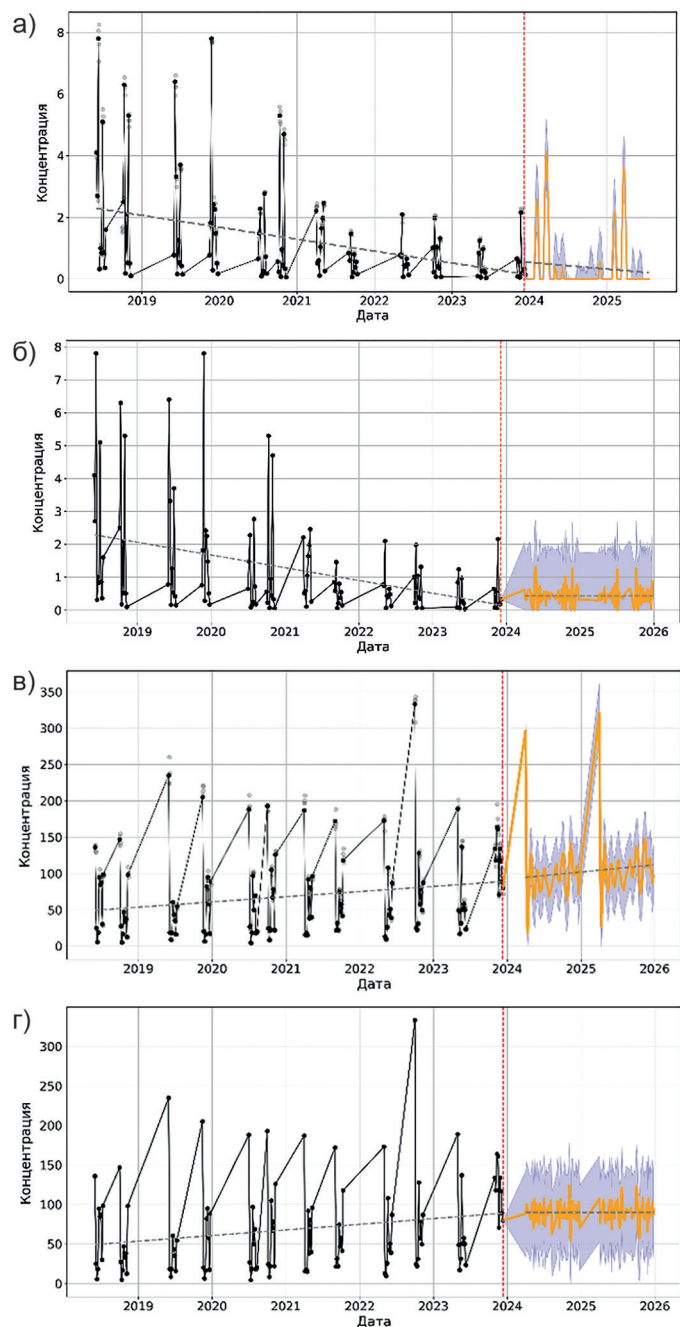


Рис. 8. Исходные и прогнозные значения концентрации нефтепродуктов, мг/л (а, б) и кальция, мг/л (в, г) по всем скважинам ЮЗАО с использованием метода Prophet (а, в) и вейвлетов (б, г); пунктирная линия — тренд, остальные обозначения — как на рис. 2

Fig. 8. Initial and predicted values of petroleum product concentration, mg/l (a, b) and calcium concentration, mg/l (v, g) for all wells in the South-Western Administrative District using the Prophet method (a, v) and wavelets (b, g); the dotted line is the trend, and the other symbols are the same as in Fig. 2

отражающие импульсное поступление загрязнителей при инфильтрации поверхностных вод.

На рис. 8 показаны результаты прогнозирования концентраций нефтепродуктов и кальция грунтовой воды по ЮЗАО в целом. Оба вещества имеют различную природу происхождения, что позволило проверить универсальность методики для прогнозирования как техногенных, так и природных компонентов.

Прогноз, построенный с помощью Prophet, логично продолжает исторический тренд. Пиковые концентрации в нем сглажены, но все же заметны — модель не «зарезает» экстремумы полностью. Для оперативного мониторинга это краеугольный момент: краткосрочные всплески могут указывать на сбой в режиме формирования качества воды, и их нельзя игнорировать.

Вейвлет-модель в паре с ARIMA неплохо справляется с квазипериодической составляющей рядов — она улавливает устойчивую часть амплитуды. Но при этом теряются локальные особенности исходного сигнала: прогноз стремится к шумовой стабилизации вокруг среднего и игнорирует пики. Сглаживание, заложенное в вейвлет-алгоритм, дает меньшую неопределенность на долгосрочных горизонтах — для стратегической оценки гидрогеологической обстановки это плюс. Однако структурные повторы ряда на разных масштабах ограничивают применимость метода в инженерных задачах, где важны именно экстремумы. Поэтому имеет смысл дополнять вейвлет-прогноз моделью, чувствительной к резким скачкам, — например, Prophet.

Заключение

На сегодняшний день достоверных гидрогеологических данных по московским урбанизированным территориям катастрофически не хватает — особен-

но если речь идет об оценке запасов и качества подземных вод. Юго-Западный округ в этом смысле особенно показателен: здесь соседствуют моренно-эрозийные возвышенности (главным образом Теплостанская), волнистые плато на водоразделах, эрозийные склоны и поймы рек Москвы, Сетуни, Очаковки и Битцы. Из-за такого рельефа глубина залегания горизонтов, фильтрационные свойства пород и защищенность от человека сильно разнятся от точки к точке — и освоение подземного пространства только усугубляет эту неоднородность.

Последнее требует специального учета при планировании водохозяйственных мероприятий, поскольку создаваемые инженерные барьеры и дренажные системы могут как снижать, так и усиливать техногенную нагрузку на водонесные горизонты.

В условиях отсутствия масштабных программ по модернизации мониторинга предложен альтернативный подход, основанный на аугментации — численном расширении временных рядов наблюдений с сохранением их статистических и структурных характеристик. Применение этой методики позволило компенсировать ограниченность эмпирических данных, характерную для урбанизированных территорий, и обеспечить возможность построения прогностических моделей, отражающих реальное пространственное распределение гидрохимических параметров.

На примере Юго-Западного административного округа Москвы, отличающегося сложным сочетанием урбанизированных и природных территорий, показано влияние морфологии и гидрографической сети на формирование качества подземных вод. Здесь располагаются истоки и верхние участки рек Сетуни, Очаковки и Битцы, многочисленные овражно-балочные системы, а так-

же каскады прудов и карстово-суффозионных понижений — Воронцовские, Тропаревские, Теплостанские и Коньковские пруды.

Использование аугментации дает возможность воспроизводить динамику как техногенных загрязнителей (нефтепродуктов), так и природных компонентов (кальция), формирующихся в водах волжско-альбского терригенного комплекса. Полученные результаты демонстрируют высокий уровень согласованности синтетических и реальных рядов, что подтверждает применимость метода для анализа разнотипных геоморфологических условий — от зон инфильтрационного питания на водоразделах до областей разгрузки в долинах Москвы-реки, Сетуни и Очаковки.

Построенные модели прогнозирования с использованием Prophet и вейвлет-анализа в сочетании с ARIMA обеспечили комплексное описание временных и частотных характеристик изменения состава подземных вод. Prophet показал высокую чувствительность к локальным колебаниям и сезонным эффектам, что особенно важно для густозастроенных районов (Нагорный, Коньково, Чертаново), тогда как вейвлет-анализ позволил выявить устойчивые квазициклические колебания, отражающие долговременные тенденции в зонах разгрузки.

Результаты моделирования указывают на общее улучшение качества под-

земных вод в последние годы, однако сохраняется риск обратного тренда при росте антропогенной нагрузки и изменении климатических условий. Вероятное увеличение интенсивности инфильтрации ливневых вод, рост плотности застройки и повышение температуры подземных горизонтов могут привести к активизации миграции нефтепродуктов и изменению гидрохимического равновесия в волжско-альбском горизонте. Особенно уязвимыми в этом отношении являются северо-восточные и долин-ные участки ТВ, где водоносные пески залегают на глубинах менее 20–25 м и находятся в непосредственной гидравлической связи с пойменными аллювиальными отложениями Москвы-реки и Сетуни.

Разработанный аналитический подход позволяет использовать краткие и фрагментарные гидрохимические ряды для статистически устойчивого прогнозирования и пространственной экстраполяции параметров. Его применение целесообразно при построении геoinформационных моделей риска загрязнения и разработке муниципальных программ охраны подземных вод.

Для ТВ и смежных территорий ЮЗАО методика открывает возможность долгосрочного планирования водопользования с опорой на статистически обоснованные сценарии изменения качества водной среды.

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. Gautam S. K. A., Arulraj G. Prince, Joshi Suneel Kumar, Cho Ch. Forecasting land-use and land-cover change for groundwater sustainability in the Muvattupuzha basin using CA-Markov (2033–2050) // Scientific Reports. 2026, vol. 16, article 7462. DOI: 10.1038/s41598-026-38961-2.

4. 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.
5. Kushwaha N. L., Sahoo M., Biwalkar N. Machine learning approaches for assessing groundwater quality and its implications for water conservation in the sub-tropical capital region of India // Water Conservation Science and Engineering. 2025, vol. 10, article 25. DOI: 10.1007/s41101-025-00348-1.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Рыбичев А. А. Управление гидрогеологическими рисками при ведении горных и строительных работ // Устойчивое развитие горных территорий. — 2026. — Т. 18. — № 2. — С. 748–755. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-2-748-755.
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. ICPCE 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., Efremenkova E. A., Demin A. Y., Martyshev 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. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Semyachkov A. I., Semyachkov K. A. 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. Gautam S. K. A., Arulraj G. Prince, Joshi Suneel Kumar, Cho Ch. Forecasting land-use and land-cover change for groundwater sustainability in the Muvattupuzha basin using CA-Markov (2033 – 2050). *Scientific Reports*. 2026, vol. 16, article 7462. DOI: 10.1038/s41598-026-38961-2.
4. 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.
5. Kushwaha N. L., Sahoo M., Biwalkar N. Machine learning approaches for assessing groundwater quality and its implications for water conservation in the sub-tropical capital region of India. *Water Conservation Science and Engineering*. 2025, vol. 10, article 25. DOI: 10.1007/s41101-025-00348-1.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Rybichev A. A. Hidrogeological risk control during mining and construction operations. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2026, vol. 18, no. 2, pp. 748 – 755. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-2-748-755.
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., Efremenkova 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дубов Никита Дмитриевич¹ — аспирант,

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

ORCID ID: 0009-0000-0068-7920,

Scopus Author ID: 60437457600,

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

зав. кафедрой, РТУ МИРЭА, НИТУ МИСИС,

e-mail: kulikova_ey@mirea.ru,

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

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

Розенталь Олег Моисеевич¹ — 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,

¹ Институт водных проблем РАН.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.D. Dubov¹, Graduate Student,

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

ORCID ID: 0009-0000-0068-7920,

Scopus Author ID: 60437457600,

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

Russian Technical University MIREA, Moscow, Russia,

NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia,

e-mail: kulikova_ey@mirea.ru,

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

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

O.M. Rosenthal¹, 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,

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

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

Получена редакцией 02.07.2026; получена после рецензии 04.08.2026; принята к печати 20.09.2026.

Received by the editors 02.07.2026; received after the review 04.08.2026; accepted for printing 20.09.2026.

