

Техногенная трансформация подземной гидросферы г. Казани. Водоносный нижнеказанский комплекс

Дарья Ивановна ПЕТРОВА*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Аннотация

Актуальность. Изучение влияния техногенеза на состояние подземных вод в черте мегаполиса является одной из наиболее актуальных социальных задач. Качество подземных вод, несоответствующее принятым предельнодопустимым концентрациям, представляет угрозу для здоровья человека и снижает благоприятность окружающей среды в целом. К началу XXI в. рост городов, концентрация населения и оживление промышленного производства привели к интенсивному техногенному прессу на подземную гидросферу. В эколого-гидрогеологических исследованиях возникает необходимость ведения мониторинговых наблюдений подземных вод на основе ГИС-технологий.

Цель работы: исследование гидрогеохимической характеристики подземных вод водоносного нижнеказанского карбонатно-терригенного комплекса для обеспечения г. Казани качественной питьевой водой из защищенных подземных источников.

Методология исследований. Использованы данные из геологических отчетов и архивные материалы за период с 1960 по 2019 г. Методы математической статистики (базовые, кластерный и факторный анализы) позволили установить природные и техногенные компоненты в химическом составе вод. Геоинформационное моделирование с применением пакета ArcGisMap показало пространственную изменчивость основных компонентов в водах нижнеказанского комплекса для второй половины XX и начала XXI в.

Результаты. Созданы цифровые модели основных компонентов в подземных водах нижнеказанского комплекса. На основе обработки данных мониторинговых исследований с применением методов математической статистики и ГИС-технологий рассмотрено влияние техногенеза на подземные воды крупного российского города за последние 60 лет. Показаны тренды изменения химического состава подземной гидросферы и причины ее трансформации.

Заключение. Природные условия водоносного нижнеказанского комплекса г. Казани оцениваются как благоприятные, так как содержания практически всех основных компонентов не превышают значений ПДК для питьевых вод.

Ключевые слова: подземные воды, нижнеказанский, гидрохимия, техногенез, мониторинг, математическая статистика, ГИС, Казань.

Введение

Становление большинства природных геосистем происходило в течение длительного времени – от первых тысяч до сотен миллионов лет. Под влиянием техногенеза трансформация отдельных природных элементов осуществляется в геологическом отношении практически мгновенно и занимает временной период от первых секунд до первых сотен лет. Подобные процессы можно отнести к быстрым, и они определяют режим развития техногеосистемы. Одним из динамичных элементов геологического пространства является подземная гидросфера верхней части земной коры [1]. Последние столетия подземные воды испытывают на себе постоянно растущее антропогенное и техногенное давление, его основными источниками являются водохозяйственный, транспортный, промышленный, селитебный типы природно-техногенных систем, а также отходы производства и потребления. В. И. Вернадский [2] измененные человеком

воды называл культурными и указывал, что все «девственные» реки исчезли и заменились новыми водами, раньше не существовавшими.

В связи с ростом городов и концентрацией населения на относительно небольшой территории в последнее время актуальными направлениями гидрогеологических исследований стали изучение и оценка техногенных факторов по изменению состава гидросферы на промышленно-урбанизированных территориях, которые исследуют трансформацию природной гидрооболочки в природно-техногенную и техногенную [3, 4]. Так, например, изучение химического состава вод позволяет оценить последствия влияния человеческой деятельности на подземную гидросферу [5–10].

Характеристика объекта и методы исследования

Город Казань является крупным (1,25 млн жителей) промышленно-культурным центром России

✉ DalPetrova@kpfu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9432-6815>

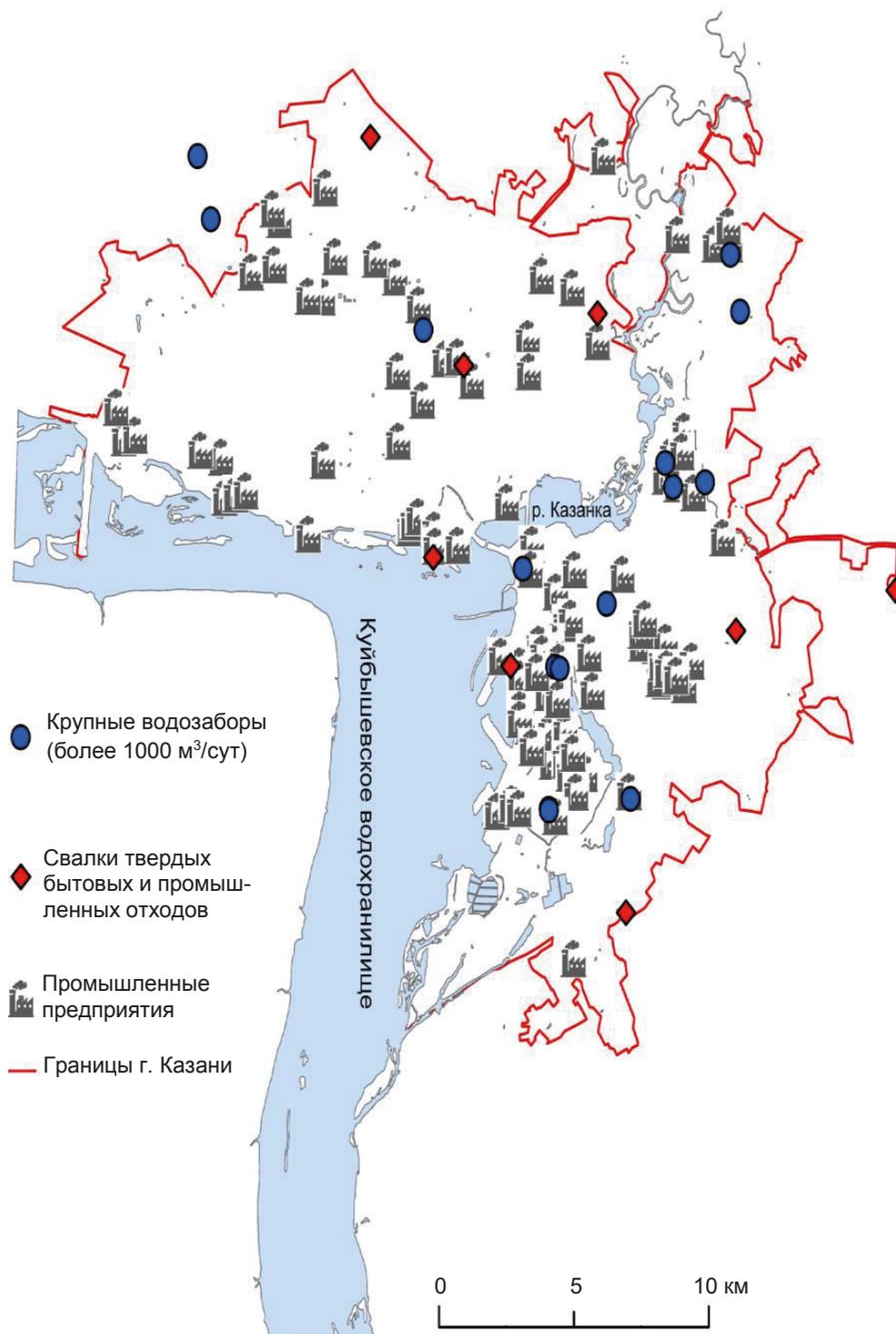


Рисунок 1. Техногенные объекты Казани
 Figure 1. Technogenic objects of Kazan

с тысячелетней историей, для которого вопросы изменения качества подземных вод являются важным элементом стратегического развития. Сегодня около 20 % питьевого водоснабжения города связано с подземными водозаборными сооружениями, а практически все крупные предприятия имеют свои скважинные водозаборы для производственного водоснабжения (рис. 1).

Начало истории гидрогеологических научных исследований Казани связано с профессором Казанского университета М. Э. Ноинским, который на рубеже XIX–XX вв. обобщил материалы бурения скважин для водоснабжения Казани. Тогда же начинаются систематические химико-бактериологические исследования подземных и поверхностных вод. В 1926–1931 гг. Л. И. Лось и В. В. Милославский

провели первое эколого-гидрогеологическое обследование очагов загрязнения подземных водозаборов Казани: воды из скважин, родников, озер, почв, сточные воды заводов и фабрик, очистные сооружения и канализация. В 1930-е гг. начались режимные наблюдения за подземными водами, которые продолжаются по настоящее время [11–14].

Территория Казани расположена в пределах Камско-Вятского артезианского бассейна и включает следующие водоносные комплексы (сверху вниз): четвертичный аллювиальный комплекс (aQ); плиоценовый аллювиальный комплекс (aN₂); нижнеказанский карбонатно-терригенный комплекс (P₂kz₁); сакмарский сульфатно-карбонатный комплекс (P₁s). В данном исследовании приведена оценка качества подземных вод нижнеказанского комплекса за период с 1960 по 2019 г.

Водоносный нижнеказанский карбонатно-терригенный комплекс мощностью 40–45 м распространен повсеместно на территории Казани, исключая глубокие эрозионные врезы палеодолины Волги. Водовмещающие породы верхней части комплекса представлены трещиноватыми песчаниками, закарстованными мергелями, известняками, реже доломитами, часто разрушенными до состояния щебня и муки. В нижней части водоносного комплекса залегает слабопроницаемая пачка «лингуловые глины», мощность которой достигает 20 м. Комплекс водообильен: удельные дебиты скважин составляют 3,0–6,0 л/с, водопроницаемость комплекса изменяется от 100 до 900 м²/сут. Питание водоносного комплекса происходит в основном за счет перетекания вод из вышезалегающих водоносных горизонтов, а кроме того, за счет подтока вод из нижнепермских водоносных горизонтов в местах их разгрузки по долинам рек. Это приводит к тому, что минерализация подземных вод нижнеказанского водоносного комплекса в основном составляет 0,5–1 г/л, а на приречных участках достигает значений 2,3–2,8 г/л. Поэтому в направлении от водоразделов к рекам происходит и изменение типа вод от гидрокарбонатного кальциево-магниевого до сульфатного кальциевого, реже хлоридно-сульфатного. Разгрузка подземных вод комплекса происходит в долины рек Волги и Казанки, а также в нижележащие водоносные комплексы.

Подземные воды нижнеказанского водоносного комплекса эксплуатируются в Казани большим количеством скважин и широко используются для производственного водоснабжения промышленных предприятий и хозяйственно-питьевых нужд. В скважинах проводятся режимные наблюдения. Нами из многочисленных геологических отчетов и архивных материалов собраны результаты 2243 химических анализов вод нижнеказанского комплекса, выполненных по стандартным методикам в аттестованных лабораториях. При анализе геоинформации наиболее широко сегодня используются факторный, корреляционный, регрессионный и кластерный методы. Поэтому статистическая обработка исходных данных проводилась с помощью программы

STATISTICA. Для построения карт-моделей пространственной изменчивости компонентов применялся программный пакет ArcGisMap, который предоставляет широкий выбор различных методов интерполяции. Так, для химических показателей водоносного нижнеказанского комплекса использовались методы обратно взвешенных расстояний и кригинга.

Результаты исследования и их обсуждение

Для сравнения и определения трендов изменения состава подземных вод г. Казани нами впервые проведен ретроспективный анализ гидрохимических проб за последние 60 лет. Данные по городским водозаборным скважинам, эксплуатирующим воды нижнеказанского комплекса, разделены на два периода: первый период включает результаты с 1960 по 2000 г., второй – с 2001 по 2019 г. Сравнение значений основных химических компонентов по периодам показало следующее (рис. 2, 3).

Большинство компонентов водоносного нижнеказанского комплекса не превышают значений предельно допустимых концентраций (ПДК) для питьевых вод согласно СанПиН [15]. К таким компонентам относятся водородный показатель, все катионы, хлориды, нитраты, перманганатная окисляемость. Превышения ПДК относительно питьевых стандартов отмечены для минерализации (сухого остатка), жесткости общей, сульфатов, аммиака, железа.

Для минерализации характерны значительные колебания (от 138 до 2780 мг/л) при средних значениях 1259,9 и 1216,6 мг/л для первого (1960–2000) и второго (2001–2019) периодов соответственно (рис. 2). Пресные воды с минерализацией до 1000 мг/л встречаются в северо-западной части города на правом берегу р. Казанки (рис. 3). Для центральной (исторической) и южной (промышленной) частей города характерны слабоминерализованные воды, что может быть связано с интенсивной селитебной и промышленной нагрузками, а также с достаточно старым фондом скважин, некоторые из которых работают более полувека.

Для сульфатов характерны примерно такие же тенденции, как и для минерализации: значительные колебания (от первых до 2000 мг/л) при средних значениях 544,9 и 383,9 мг/л для первого (1960–2000) и второго (2001–2019) периодов соответственно (рис. 2). Заметна тенденция расширения в XXI в. области сульфатных вод в центральной и южной частях Казани (рис. 3) при одновременном уменьшении сульфат-иона на правом берегу р. Казанки. Хлориды нехарактерны для вод нижнеказанского комплекса (от первых до 270 мг/л), хотя тенденция их увеличения в последние десятилетия проявлена достаточно отчетливо (рис. 2, 3).

Относительное беспокойство может вызывать увеличение концентраций нитратов от 0,43 мг/л в первый период до 9,37 мг/л во второй период (рис. 2), хотя ПДК нитратов по СанПиН составляет 45 мг/л [15]. Предположительно, тенденция увеличения нитратов обусловлена недостаточной очисткой

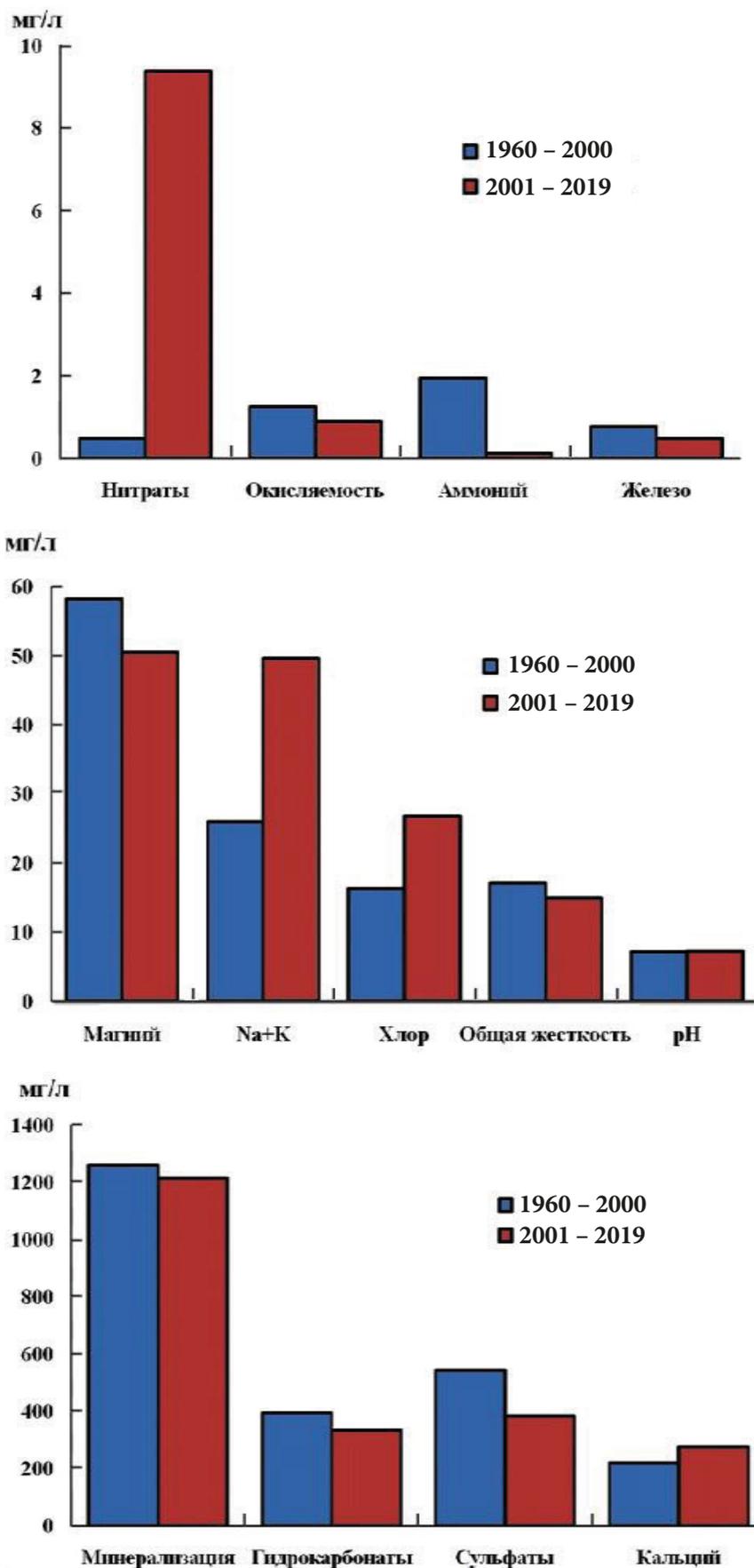


Рисунок 2. Сравнение средних содержаний основных компонентов в подземных водах нижнеказанского комплекса за периоды 1960–2000 и 2001–2019 гг.

Figure 2. Comparison of the average contents of the main components in the groundwater of the Nizhnekazan complex for the periods 1960–2000 and 2001–2019

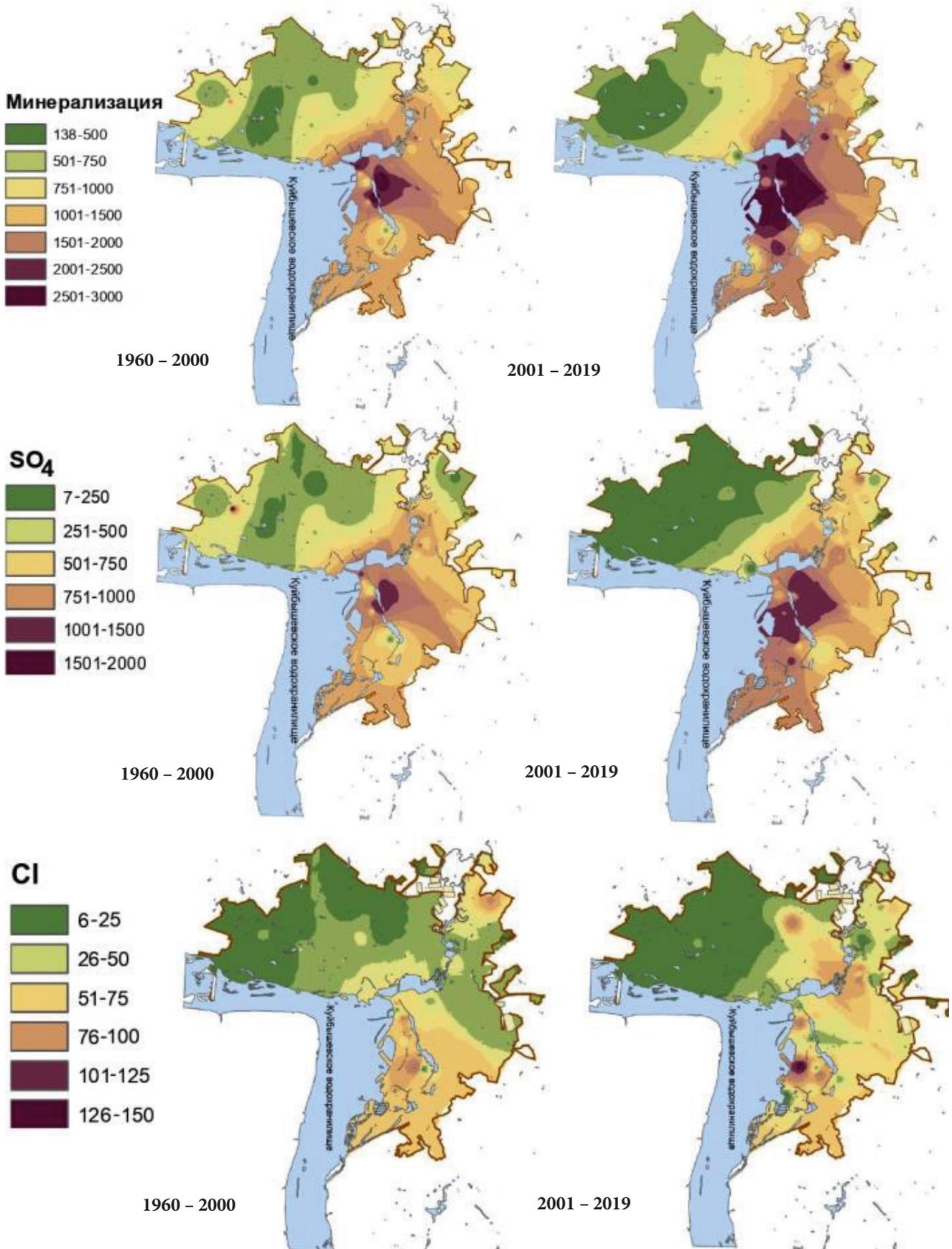


Рисунок 3. Карты изменения содержаний основных компонентов в подземных водах нижнеказанского комплекса, мг/л
 Figure 3. Maps of changes in the contents of the main components in the underground waters of the lower Kazanian complex, mg/l

коммунально-бытовых стоков, которые проходят через мощный естественный фильтр пород, перекрывающих нижнеказанский комплекс, и только через десятилетия могут достигать водоносных горизонтов. На территории Казани имеются примеры самоочищения техногенно преобразованных подземных вод нижнеказанского комплекса. Так, максимальная концентрация железа (233 мг/л) зафиксирована в конце XX в. на водозаборе ТПО «Свияга» КЭТЗ. В настоящее время водозабор не работает, а концентрация железа снизилась до 20 мг/л, что свидетельствует о возможности природной реабилитации подземных вод. Однако период полного восстановления природных кондиций может составить очень продолжительный отрезок времени.

При обработке результатов гидрохимических анализов использовались методы многомерной статистики: кластерный и факторный анализ (табл. 1, рис. 4). Первый выделяет на основе множества переменных компонентов гидрохимического анализа классы (кластеры) параметров таким образом, чтобы объекты, входящие в один класс, были более сходными по сравнению с объектами, входящими в другие классы. Наиболее распространенным методом кластерного анализа в научных исследованиях, который использовался и в данной статье, является метод объединения (древовидной кластеризации), в результате которого создается иерархическое дерево с возможностью обнаружения кластеров (ветвей) и их интерпретации. Кластерный анализ позволяет рассматривать достаточно большой объем информации и резко сокращать большие массивы информации, делать их компактными и наглядными [8].

Факторный анализ позволяет выявить зависимость между гидрохимическими данными для исследования статистически связанных признаков с целью выявления определенного числа скрытых (внутренних) причин, формирующих специфику изучаемого явления. С помощью факторного анализа определяется мера связи между параметрами и выявляются обобщенные факторы, лежащие в основе изменений характеристик. Целью подобного анализа выступает выражение большого числа рассматриваемых параметров через меньшее число более емких внутренних характеристик явления (редукция данных с помощью метода главных компонент). Таблица факторных нагрузок содержит строки (по числу признаков) и столбцы (по числу факторов). Факторный вес представляет собой количественное значение выделенных факторов для каждого из имеющих объектов. Объекту с большим значением факторного веса присуща большая степень проявления свойств, определяемых данным фактором. В статье факторный анализ использовался для сокращения параметров с выделением главных компонент (для объяснения наблюдаемых вариаций) и классификации переменных параметров с выделением главных факторов (для объяснения корреляционных связей).

Обработка результатов анализов вод нижнеказанского комплекса г. Казани с помощью кластерного анализа выявила природную и техногенную группы компонентов (рис. 4). К техногенным компонентам относятся хлориды и нитраты; менее выражена приуроченность к данной группе минерализации, железа, сульфатов и общей жесткости. Природными

Таблица 1. Факторные нагрузки для компонентов нижнеказанского комплекса
Table 1. Factor loads for the components of the Nizhnekazan complex

Компонент	Природный фактор 1		Техногенный фактор		Природный фактор 2	
	1960–2000	2001–2019	1960–2000	2001–2019	1960–2000	2001–2019
pH	-0,90	-0,05	0,28	0,12	-0,24	-0,92
Минерализация	0,94	0,10	0,09	0,92	-0,19	-0,07
Жесткость общая	0,87	0,18	-0,26	0,95	-0,34	-0,07
Окисляемость перманганатная	-0,61	-0,72	0,68	-0,17	0,01	0,08
HCO ₃	-0,67	-0,72	0,00	-0,10	0,47	0,28
Cl	0,89	0,88	0,30	0,37	0,25	0,08
SO ₄	0,72	0,07	0,29	0,94	0,25	-0,13
NO ₃	0,69	0,97	-0,24	-0,10	0,44	0,12
NO ₂	-0,18	0,93	0,97	-0,08	0,10	0,07
Na + K	0,03	0,07	0,94	0,43	0,05	0,04
Ca	0,20	0,29	0,15	0,74	0,84	0,46
Mg	0,78	-0,28	-0,41	0,60	-0,33	0,47
Железо общее	-0,21	-0,01	0,04	0,60	0,95	-0,13
Вес фактора, %	44,26	29,59	22,02	33,12	19,04	10,99

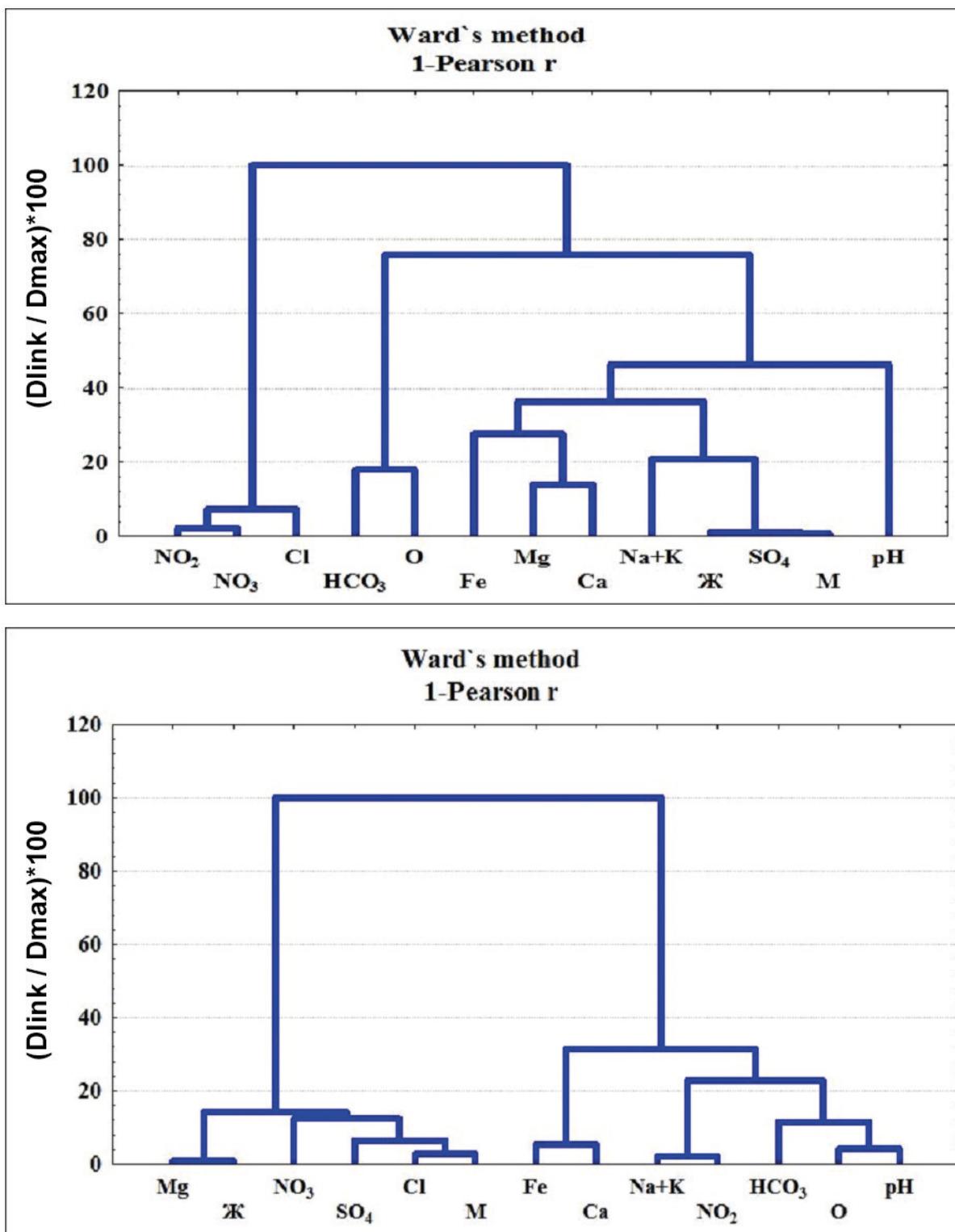


Рисунок 4. Кластерные диаграммы основных компонентов. Внизу – период 1960–2000 гг., сверху – период 2001–2019 гг.: М – минерализация; Ж – общая жесткость; О – окисляемость

Figure 4. Cluster diagrams of major components. Below – the period 1960–2000, above – the period 2001–2019: M – mineralization; W – total hardness; O – oxidizability

компонентами вод нижеказанского комплекса являются гидрокарбонаты, окисляемость, водородный показатель и, возможно, катионы.

При сравнении кластерных диаграмм по периодам наблюдений выявляются некоторые различия (рис. 4), которые, по нашему мнению, могут быть

связаны с разной степенью техногенной нагрузки на воды нижеказанского комплекса Казани в XX и XXI вв. Подобный же вывод следует из анализа факторных нагрузок (табл. 1). Так, техногенные факторы для двух периодов наблюдений контрастно различаются, тогда как наиболее значимый «природный»

фактор 1 достаточно хорошо выделяется набором общих компонентов. По весу техногенных факторов можно вычислить количественный вклад техногенеза в состав подземных вод. Из данных табл. 1 видно, что техногенная нагрузка на подземные воды нижеказанского комплекса в начале XXI в. выше (33 %), чем в XX в. (22 %). Это находит подтверждение и в картах изменения содержаний основных компонентов (рис. 3).

Выводы

Резюмируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Впервые для подземных вод нижеказанского комплекса г. Казани проведен системный ретроспективный анализ гидрохимических данных за большой период наблюдений.

2. Показано, что использованные статистический и картографический методы обработки и

представления гидрохимической информации можно использовать для изучения и мониторинга водоносных комплексов урбанизированных территорий.

3. С помощью методов многомерной математической статистики имеется возможность разработки количественных критериев идентификации и оценки вклада техногенного влияния на объекты подземной гидросферы на промышленно-урбанизированных территориях.

4. Актуально создание на основе современных ГИС-технологий постоянно действующих моделей водоносных комплексов подземных вод г. Казани для проведения цифрового мониторинга и выработки приоритетных направлений городской экологической политики с учетом гидрогеологической информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зекцер И. С. Подземные воды как компонент окружающей среды. М.: Научный мир, 2001. 328 с.
2. Вернадский В. И. История природных вод. М.: Наука, 2003. 750 с.
3. Сунгатуллин Р. Х. Влияние техногенеза на формирование современных кор выветривания и водоносных ареалов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2010. № 6. С. 494–502.
4. Сунгатуллин Р. Х., Хазиев М. И. Системный подход при изучении гидросферы на промышленно-урбанизированных территориях // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2009. № 1. С. 19–31.
5. Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Швец В. М. Геохимия подземных вод: теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с. URL: <https://elib.pstu.ru/vufind/Record/RUPSTUbooks75812>
6. Техногенные процессы в подземных водах / А. Б. Лисенков [и др.]. М.: Научный мир, 2003. 248 с.
7. Сунгатуллин Р. Х. Химический состав подземной и поверхностной гидросфер (на примере Набережно-Челнинской площади) // Ученые записки КГУ. Естественные науки. 2009. Т. 151. Кн. 3. С. 153–166.
8. Шварц А. А. Химический состав подземных вод Санкт-Петербургского региона в свете новых требований к качеству питьевой воды // Вестник СПбГУ. 2005. Сер. 7. Вып. 1. С. 85–93.
9. Шукова И. В. Формирование химического состава подземных вод зоны активного водообмена на территории г. Перми: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Пермь, 2005. 23 с.
10. Barrett M. H., Hiscock K. M., Pedley S., Lerner D. N., Tellam J. H., French M. J. Marker species for identifying urban groundwater recharge sources: A review and case study in Nottingham, UK // Water Research. 1999. Vol. 33. No. 14. P. 3083–3097.
11. Гидрогеологические и инженерно-геологические условия города Казани / науч. ред. А. И. Шевелев. Казань: Казан. ун-т, 2012. 236 с.
12. Малышева О. Н., Нелидов Н. Н., Соколов М. Н. Геология района г. Казани / под ред С. Г. Каштанова. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1965. 96 с.
13. Каштанов С. Г. Подземные воды Казани. Казань: Изд-во КГУ, 1979. 96 с.
14. Мусин Р. Х., Курлянов Н. А., Файзрахманова З. Г., Мусина Р. З. О качестве вод, используемых в системах питьевого водоснабжения города Казани // Георесурсы. 2014. № 3 (58). С. 9–16. <http://dx.doi.org/10.18599/grs.58.3.2>
15. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М., 2001. 62 с.

Статья поступила в редакцию 10 марта 2021 года

Technogenic transformation of the underground hydrosphere of Kazan. Lower Kazanian aquifer complex

Dar'ya Ivanovna PETROVA*

Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

Abstract

Relevance. By the beginning of the XXI century, the growth of cities, population concentration and the revival of industrial production led to an intense technogenic pressure on the underground hydrosphere. In ecological and hydrogeological studies, it becomes necessary to conduct monitoring observations of groundwater based on GIS technologies.

Purpose of the work: study of the hydrogeochemical characteristics of underground waters of the aquiferous lower Kazanian carbonate-terrigenous complex to provide Kazan with high-quality drinking water from protected underground sources.

Research methodology. Hydrochemical data from geological reports and archival materials for the period from 1960 years to 2019 years were used. Methods of mathematical statistics (basic, cluster and factor analyzes) made it possible to differentiate into natural and man-made components. Geographic information modeling using the “ArcGisMap” package showed the spatial variability of the main components in the waters of the Neogene complex at the turn of the 20th and 21st centuries.

Conclusion. The hydrochemical parameters of the aquiferous lower Kazanian complex are assessed as favorable, since practically all the main components do not exceed the MPC values for drinking water.

Keywords: groundwater, lower Kazanian, hydrochemistry, technogenesis, monitoring, mathematical statistics, GIS, Kazan.

REFERENCES

1. Zektser I. S. 2001, Underground waters as a component of the environment. Moscow, 328 p. (*In Russ.*)
2. Vernadsky V. I. 2003, History of natural waters. Moscow, 750 p. (*In Russ.*)
3. Sungatullin R. Kh. 2010, Influence of technogenesis on the formation of modern weathering crusts and water-bearing areas. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, no. 6, pp. 494–502. (*In Russ.*)
4. Sungatullin R. Kh., Khaziev M. I. 2009, A systematic approach to the study of the hydrosphere in industrial-urbanized territories. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, no. 1, pp. 19–31. (*In Russ.*)
5. Krainov S. R., Ryzhenko B. N., Shvets V. M. 2004, Geochemistry of underground waters: Theoretical, applied and environmental aspects. Moscow, 677 p. (*In Russ.*) URL: <https://elib.pstu.ru/vufind/Record/RUPSTUbooks75812>
6. Lisenkov A. B., Fisun N. V., Malkov A. V. and other. 2003, Technogenic processes in groundwater. Moscow, 248 p.
7. Sungatullin R. Kh. 2009, Chemical composition of underground and surface hydrospheres (on the example of Naberezhno-Chelninskaya area). *Uchenye zapiski KSU. Natural Sciences*, vol. 151, book 3, pp. 153–166. (*In Russ.*)
8. Schwartz A. A. 2005, Chemical composition of groundwater in the St. Petersburg region in the light of new requirements for the quality of drinking water. *Bulletin of St. Petersburg State University*, ser. 7, no. 1, pp. 85–93. (*In Russ.*)
9. Shchukova I. V. 2005, Formation of the chemical composition of groundwater in the zone of active water exchange on the territory of Perm. Avtoref. dis ... cand. geol.-mineral. sciences. Perm, 23 p. (*In Russ.*)
10. Barrett M. H., Hiscock K. M., Pedley S. et al. 1999. Marker species for identifying urban groundwater recharge sources: A review and case study in Nottingham, UK. *Water Research*, vol. 33, no. 14, pp. 3083–3097.
11. 2012, Hydrogeological and engineering-geological conditions of the city of Kazan / Scientific. ed. A. I. Shevelev. Kazan, 236 p. (*In Russ.*)
12. Malysheva O. N., Nelidov N. N., Sokolov M. N. 1965, Geology of the Kazan region / under the editorship of S. G. Kashtanov. Kazan: Kazan Publishing House University, 96 p. (*In Russ.*)
13. Kashtanov S. G. 1979, Underground waters of Kazan. Kazan: KSU Publishing House, 96 p. (*In Russ.*)
14. Musin R. Kh., Kurlyanov N. A., Fayzrakhmanova Z. G., Musina R. Z. 2014, About the quality of waters used in drinking water supply systems in Kazan. *Georesursy*, no. 3 (58), pp. 9–16. (*In Russ.*) <http://dx.doi.org/10.18599/grs.58.3.2>
15. SanPiN 2.1.4.1074-01. SanPiN 2.1.4.1074-01. Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Moscow, 2001, 62 p. (*In Russ.*)

The article was received on March 10, 2021

✉ DaIPetrova@kpfu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9432-6815>