

УДК 504.45 (470.324)

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ УНИФИЦИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ
ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИСТОЧНИКОВ
ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ПИТЬЕВОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ
КРУПНОГО АГРОПРОМЫШЛЕННОГО РЕГИОНА

А. С. БОЕВА *, Т. И. ПРОЖОРИНА **, Э. Г. ПОТАПОВА ***

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Настоящее исследование посвящено разработке и апробации унифицированной методики для комплексной геоэкологической диагностики состояния источников децентрализованного хозяйственно-питьевого водопользования. В качестве модельного региона выбрана Воронежская область с населением 2,285 млн человек с развитой индустриально-аграрной структурой хозяйства.

Предлагаемая методика основана на совокупности научно-методических подходов к сбору, анализу, обработке и представлению информации о качестве питьевых вод, уровнях экологических рисков для здоровья населения на основе методов вероятностно-статистического анализа экогеоданных, технологиях геоинформационного моделирования и картографирования.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.192>

Keywords: priority pollutants, decentralised water sources, drinking water quality, administrative areas, health risk assessment.

Введение. В связи с прогрессирующим загрязнением водных ресурсов, которые испытывают колоссальный прессинг со стороны промышленных и сельскохозяйственных предприятий, для Воронежской области проблема рационального водопользования и экологических рисков для населения от употребления питьевой воды, не соответствующей гигиеническим стандартам качества, имеет актуальное значение среди экологических проблем региона.

На территории Воронежской области регулярно проводятся эколого-гигиенические исследования по оценке состояния источников централизованного хозяйственно-питьевого водопользования и оценке риска для здоровья населения от воздействия химических веществ, загрязняющих питьевую воду, результаты которых отражены в научных трудах [1–5] и др., а также в докладах Управления Роспотребнадзора по Воронежской области (1998–2023 гг.) [6].

* E-mail: boevaas0226@mail.ru

** E-mail: coriandre@rambler.ru

*** E-mail: amyliapotapowa@yandex.ru

Вместе с тем, необходимо отметить недостаточность разработанности научно-методического аппарата унифицированной комплексной оценки качества подземных вод и экологических рисков водопользования для территории крупного агропромышленного региона. Причем в научных исследованиях недостаточное внимание уделяется состоянию источников децентрализованного хозяйственно-питьевого водопользования (ДХПВ) селитебных территорий региона, которые из-за отсутствия централизованного водопровода повсеместно распространены в большинстве сельских поселений. Эта вода в естественном виде без предварительной очистки используется местными жителями в питьевых целях и зачастую характеризуется несоответствием химического состава гигиеническим нормативам [7–10]. При этом Управлением Роспотребнадзора по Воронежской области на постоянной основе ведется мониторинг за состоянием объектов только централизованного водоснабжения (источники и распределительная водопроводная сеть), а наблюдения за источниками ДХПВ не предусмотрены. Поэтому определение качества данного вида водопользования позволит оценить экологические риски для здоровья населения.

Таким образом, для решения проблем, связанных с водным фактором, и обоснования региональной водохозяйственной политики региона особую актуальность приобретают геоэкологические исследования, связанные с оценкой качества источников ДХПВ селитебных территорий Воронежской области.

Цель исследования – разработка методики комплексной геоэкологической диагностики состояния источников ДХПВ для повышения уровня безопасности и снижения экологических рисков для здоровья населения территории крупного агропромышленного региона.

Материалы и методы исследования. В качестве модельного региона выбрана Воронежская область с населением 2,285 млн человек с развитой индустриально-аграрной структурой хозяйства, входящая в состав Центрально-Черноземного района РФ. Методология исследований базируется на теоретических подходах и практических методиках экспериментальных исследований, принятых в экологической гидрохимии, а также на алгоритмах корреляционного, кластерного анализов и оценки риска для здоровья [11, 12].

Анализ обеспеченности населения региона эксплуатационными ресурсами подземных вод питьевого качества показал, что в среднем по Воронежской области централизованным водоснабжением обеспечено 61,3% населения (в том числе в городских округах (ГО) – 95,4%, в районах – 58,0%); децентрализованным – 38,7% (в ГО – 4,6%, в районах – 42,0%). Таким образом, из-за отсутствия централизованного водопровода около 892,4 тыс. человек на территории региона вынуждены использовать для питьевых целей воду децентрализованных источников (индивидуальные скважины, колодцы, одиночные колонки, родники), в большинстве случаев характеризующуюся низким качеством.

В качестве мониторинговых точек контроля были выбраны следующие категории селитебных территорий: города Воронеж, Нововоронеж и Борисоглебск и 162 населенных пункта в 31 муниципальном районе области.

Обоснованность выбора местоположения отбора проб воды обусловлена тем, что количество мониторинговых точек охватывает относительно равномерно всю территорию с учетом проживающего населения, а их анализ позволяет дать репрезентативную картину водопользования, типичную для региона.

Экспедиционные исследования проходили с 2024 г. по первое полугодие 2025 г., в ходе них было отобрано 302 разовые пробы воды, в том числе из 113 скважин, 53 колодцев, 31 колонки и 105 родников. Экспериментальная часть работы выполнена на базе аттестованной (свидетельство № 273.002/11) эколого-аналитической лаборатории факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета. Химический анализ отобранных проб выполняли с применением следующих методов: титриметрический (общая жесткость, Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), потенциометрический (рН), кондуктометрический (минерализация), колориметрический ($\text{Fe}_{\text{общ.}}$, $\text{Mn}_{\text{общ.}}$, $\text{V}_{\text{общ.}}$, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) [13]. Полученные результаты сравнивали с ПДК для вод хозяйственно-питьевого назначения для децентрализованных источников, соответствующие санитарно-гигиеническим требованиям СанПиН 1.2.3685-21 [14]. Комплексная оценка качества отобранных проб воды проводилась по показателям органолептического, химического и микробиологического анализов.

Результаты исследований и их обсуждение. Повышенные значения органолептических показателей косвенно свидетельствуют о загрязнении исследованных источников ДХПВ, так как установлено, что качество питьевой воды не соответствует нормативам по интенсивности вкуса (12,5%) и запаха (11,54%), цветности (9,62%), наличию недопустимого в воде осадка (8,65%).

Показатели качества питьевой воды в источниках ДХПВ в целом по Воронежской области (результаты собственных исследований)

Наименование показателя и единицы измерения	Показатель			ПДК для ДХПВ	Удельный вес проб, не соотв. нормативу, %	Максимальное превышение норматива (число раз)
	минимум	максимум	среднее			
рН	5,61	8,35	6,5	6,0–9,0	1,44	–
Минерализация, мг/л	77	1930	518	1500	0,48	1,29
Общая жесткость, ммоль/л	2,1	30,5	9,0	10,0	28,37	3,05
Ca^{2+} , мг/л	15,4	318,8	109	200	2,71	1,59
Mg^{2+} , мг/л	3,0	146,2	40	100	3,85	1,46
HCO_3^- , мг/л	12,9	532,2	216,4	500	0,96	1,06
SO_4^{2-} , мг/л	10,5	510	78,6	500	0,48	1,02
Cl^- , мг/л	6,9	684,4	87,9	350	2,40	1,95
$\text{Fe}_{\text{общ.}}$, мг/л	0,01	5,51	0,2	1,0	5,80	5,51
$\text{Mn}_{\text{общ.}}$, мг/л	0,01	0,44	0,04	0,5	0	0
$\text{V}_{\text{общ.}}$, мг/л	0,05	1,5	0,13	–	0,96	2,0
NH_4^+ , мг/л	0,05	10,53	0,5	–	12,5	5,27
NO_2^- , мг/л	0,01	6,51	2	3,3	2,40	1,97
NO_3^- , мг/л	0,19	505,5	46,7	45	30,29	11,23

Результаты около 8200 химических анализов проб воды (см. таблицу) показали, что наибольший процент проб, не соответствующих санитарно-гигиеническим нормам, отмечается по нитратам (30,3%), солям жесткости (28,4%), аммонийному азоту (12,5%) и железу (5,8%); максимальные превышения ПДК для источников ДХПВ зафиксированы по содержанию нитратов (в 11,2 раза), железа (в 5,5 раза), аммонийному азоту (в 5,3 раза), общей жесткости (в 3,1 раза) и минерализации (в 1,3 раза). Выявлено нитратное загрязнение питьевых вод на территории 14 муниципальных районов и 3 ГО (около 50% территории региона).

Оценка качества питьевой воды на эпидемиологическую безопасность показала, что 31,8% проб (из 22 выборочных индивидуальных скважин) опасны для здоровья людей, так как не соответствуют нормативам по микробиологическим показателям: ОМЧ – 18%; ОКБ – 27%; ТКБ – 9%.

В соответствии с [15] была выполнена оценка экологических рисков здоровью населения, обусловленных качеством питьевой воды из источников ДХПВ, которая показала, что наиболее неблагоприятна ситуация по уровням индивидуальных неканцерогенных рисков отмечается по 2 компонентам:

а) нитраты: для детей на территории 19 районов и 2 ГО ($HQ = 1,03–6,63$); для взрослых – на территории 10 районов и одного ГО ($HQ = 1,06–2,84$);

б) общая жесткость: для детского и взрослого населения на территории 8 районов ($HQ = 1,03–1,43$).

Расчет индекса опасности развития неканцерогенных эффектов, влияющих на кроветворную систему, для условий одновременного поступления пероральным путем 3-х веществ однонаправленного действия (марганец, железо, нитраты) показал, что риск по средним значениям концентраций 3-х веществ для взрослых не превышает 1 ($HI=0,76$), а для *детей* вызывает опасение ($HI=1,78$), а при расчете по максимальным концентрациям вызывает опасение не только для детей ($HI=6,33$), но и для взрослых ($HI=2,71$).

Расчет численности населения из группы популяционного риска показал, что около 55,8 тыс. жителей региона подвергаются потенциальной опасности для здоровья из-за употребления воды ненадлежащего качества (4,1% детей и 2,5% взрослого населения).

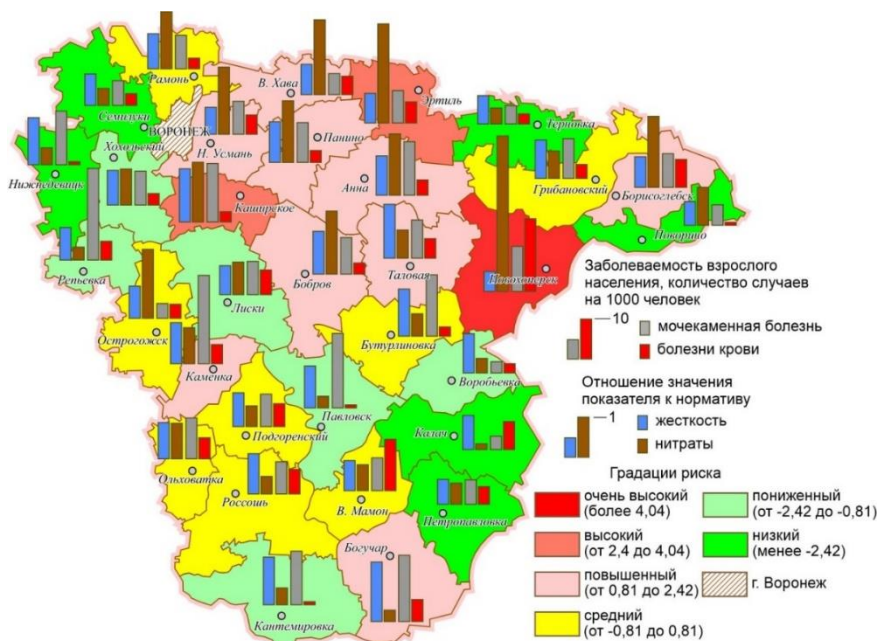
На основе метода сигмальных отклонений по каждому приоритетному показателю качества питьевой воды построены оценочные шкалы и выполнено ранжирование территорий Воронежской области по трем уровням (низкий, средний, высокий) загрязнения источников ДХПВ. Результаты расчета показывают, что к числу территорий риска (высокий уровень загрязнения) по всем 4 приоритетным загрязнителям питьевой воды отнесены от 9 до 11 из 34-х административных территорий области. При этом из 302 исследованных проб “высокий” уровень загрязнения источников ДХПВ отмечается в среднем на уровне 24% (72 пробы) по двум из 4-х загрязнителей: минерализации и общей жесткости.

Для количественной оценки корреляции, т.е. связи между уровнем заболеваемости, обусловленной водным фактором, и концентрацией приоритетных загрязнителей в питьевой воде рассчитали коэффициенты парной корреляции, которые показали присутствие двух типов закономерностей (два комплекса):

1) положительная статистически достоверная корреляция средней степени между заболеваемостью взрослого населения мочекаменной болезнью и общей жесткостью (12% взаимообусловленности), отражающая природный фактор риска; 2) аналогично – корреляция между заболеваемостью взрослого населения болезнями крови, кожи и загрязненностью вод нитратами (соответственно 22% и 14% взаимообусловленности), характеризующая техногенный риск загрязнения питьевой воды.

Заключительным этапом апробации методики стало геоэкологическое зонирование территории региона по экологическим рискам водопользования [16]. Проведенная типизация районов и ГО области с использованием метода суммации нормализованных значений 2-х комплексов приоритетных медико-экологических показателей – “качество воды” и “заболеваемость населения” – позволила дифференцировать территорию региона на 5 типов территорий по соотношению показателей качества воды и уровней заболеваний взрослого населения, реагирующих на качество питьевой воды (см. карту).

Территории высокого и повышенного риска – 8 муниципальных территорий высокой сельскохозяйственной освоенности центрального и восточного секторов области (ГО Борисоглебский, Новохоперский район), северного (Каширский, Аннинский, Таловский, Бутурлиновский районы), а также, фрагментарно, западного (Каменский район) и южного секторов области (Богучарский район), характеризующиеся повышенным риском развития мочекаменной болезни у населения и болезней крови на фоне высокого нитратного загрязнения либо повышенной общей жесткости воды преимущественно неоген-четвертичных водоносных комплексов, питающих источники ДХПВ.



Карта типизации территории Воронежской области по риску заболеваний от употребления питьевой воды из источников ДХПВ.

Наиболее благополучная территория (вне зоны риска) рассредоточена по трем секторам области: северо-западному (Семилукский, Нижнедевицкий, Хохольский, Лискинский районы), юго-восточному (Воробьевский, Калачеевский, Петропавловский районы) и, фрагментарно, восточному (Поворинский, Терновский районы). Эти районы преимущественно умеренного уровня сельскохозяйственного освоения и соответствуют более экологически благополучным территориям распространения верхнедевонских водоносных комплексов, питающих большинство источников ДХПВ.

Дополнительно нами проведена кластеризация территории региона по сходству приоритетных факторов экологического риска и заболеваний, обусловленных качеством воды из источников ДХПВ. Кластерный анализ проведен по более широкому спектру: 16 диагностических признаков (4 приоритетных фактора риска: жесткость, минерализация, железо, нитраты; 12 показателей заболеваемости за 2019–2021 гг.: мочекаменная болезнь, болезни крови, кожи, мочеполовой системы среди взрослых, подростков и детей). Выделены 5 кластеров (однотипных территорий), отличающихся следующими сходными чертами.

1 кластер (Таловский район) – характеризуется максимальными показателями минерализации и жесткости воды, повышенным содержанием железа при общей невысокой концентрации нитратов в воде за счет расположения на стыке неоген-четвертичного и верхнемелового водоносных комплексов повышенной природной минерализации; уровни заболеваемости мочекаменной болезнью и мочеполовой системы среди подростков и детей на максимальном уровне; своеобразная “гидроэкологическая аномалия” по составу подземных вод и характеристикам питьевой воды.

2 кластер (ГО Борисоглебский; районы: Аннинский, Новоусманский, Новохоперский, Эртильский) – северный и восточный сектора области, характеризуются максимальными показателями содержания железа и нитратов в воде, что сопровождается повышенной заболеваемостью взрослого населения прежде всего болезнями крови и кожи. Это самый неблагоприятный кластер с максимальными показателями экологических рисков.

3 кластер (районы: Бутурлиновский, Каменский, Кантемировский, Павловский, Репьевский) – характеризуется повышенной минерализацией и жесткостью воды при минимальных показателях содержания железа и нитратов.

4 кластер (районы: Бобровский, Богучарский, Воробьевский, Грибановский, Калачеевский, Каширский, Панинский, Петропавловский, Подгоренский, Россошанский) – характеризуется аналогично 3 кластеру повышенной минерализацией и жесткостью воды, но одновременно – более высокими концентрациями железа и нитратов (в пределах нормы) и повышенными показателями заболеваемости детей и подростков.

5 кластер (районы: Верхнехавский, Верхнемамонский, Нижнедевицкий, Лискинский, Острогожский, Ольховатский, Рамонский, Поворинский, Семилукский, Хохольский, Терновский) – характеризуется пониженными и минимальными показателями загрязнения вод; близкими к средним или ниже средних показателями заболеваемости по большинству классов болезней

населения. Это самый благоприятный кластер с минимальными экологическими рисками для здоровья населения, связанными с качеством питьевого водопользования.

Заключение. Данное исследование посвящено разработке и апробации унифицированной методики для комплексной геоэкологической диагностики состояния источников ДХПВ селитебных территорий Воронежской области, подвергающихся природному и антропогенному воздействию. Предложенная методика обобщает современный эколого-гигиенический и географический подходы к комплексной оценке качества источников питьевого водопользования на основе сопряженного учета гидрохимических, микробиологических показателей качества и критериев риска для здоровья населения с применением методов геоинформационного моделирования и картографирования.

По итогам исследования разработана система рекомендаций по основным направлениям региональной водохозяйственной политики, эффективность которых подтверждена в ходе практического внедрения.

Поступила 04.04.2025

Получена с рецензии 23.05.2025

Утверждена 15.08.2025

ЛИТЕРАТУРА

1. Степкин Ю.И., Борисов Н.А., Денисенко В.И. Санитарно-гигиеническая оценка качества питьевого водоснабжения. В сб.: *Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы* (2011), 100–102.
2. Механтьев И.И., Клепиков О.В. Комплексная оценка санитарно-эпидемиологической надежности систем централизованного питьевого водоснабжения сельских территорий. *Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание* 5 (2020), 119–124.
<https://doi.org/10.24411/2075-4094-2020-16754>
3. Куролап С.А., Клепиков О.В., Баскакова А.Г. Оценка риска для здоровья населения, связанного с качеством питьевой воды и безопасностью систем водоснабжения. В сб.: *Оценка экологических рисков водопользования на территории крупного урбанизированного региона* (2021), 5–20.
4. Механтьев И.И., Клепиков О.В. и др. Современные гигиенические проблемы питьевого водоснабжения населения Воронежской области. *Тенденции развития науки и образования* 79 (2021), 28–32.
<https://doi.org/10.18411/trnio-11-2021-09>
5. Механтьев И.И. Риск здоровью населения Воронежской области, обусловленный качеством питьевой воды. *Здоровье населения и среда обитания. ЗниСО* 4 (2020), 37–42.
<https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-325-4-37-42>
6. Доклад “О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Воронежской области в 2023 году”. Воронеж, Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Воронежской области (2024), 193.
7. Боева А.С., Прожорина Т.И. и др. Геоэкологическая оценка состояния родников на территории Воронежской области. *Вестник Воронеж. гос. ун-та. География. Геоэкология* 1 (2022), 103–112.
<https://doi.org/10.17308/geo.2022.1/9091>

8. Боева А.С. Оценка экологических рисков для здоровья населения Воронежской области, связанных с качеством питьевой воды в источниках децентрализованного водопользования. *Вестник Воронеж. гос. ун-та. География. Геоэкология* 3 (2023), 90–97.
<https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/3/90-97>
9. Прожорина Т.И., Куролап С.А., Преснякова Ю.А. Геоэкологическая оценка качества источников хозяйственно-питьевого водоснабжения урбанизированных и сельских территорий Воронежской области. *Вестник Удмурд. ун-та. Биология. Науки о Земле* 29 (2020), 213–220.
<https://doi.org/10.35634/2412-9518-2020-30-1-53-63>
10. Прожорина Т.И., Боева А.С. Анализ загрязнения питьевых вод нитратами и оценка риска для здоровья населения Воронежской области. *Известия Дагестанского гос. педагог. ун-та. Естественные и точные науки* 15 (2021), 89–95.
<https://doi.org/10.31161/1995-0675-2021-15-1-89-95>
11. Базарский О.В., Курьшев А.А., Силкин Е.Ю. *Статистические методы обработки информации в экологии: учеб. пособие*. Воронеж, Издат. дом ВГУ (2021), 54.
12. Маркин В.Н., Раткович Л.Д., Глазунова И.В. *Особенности методологии комплексного водопользования*. Москва, Российский гос. аграрный ун-т, МСХА им. К.А. Тимирязева (2016), 140.
13. Каверина Н.В., Прожорина Т.И. и др. *Методы экологических исследований* (учеб. пособие для вузов). Воронеж, Научная книга (2019), 355.
14. СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”. Раздел III: Нормативы качества и безопасности воды (2021), 987.
15. Р 2.1.10.3968-23. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Москва, Роспотребнадзор (2023), 221.
16. Куролап С.А., Клепиков О.В. и др. *Практикум по оценке риска для здоровья населения, связанного с химическим загрязнением окружающей среды* (учеб. пособие). Воронеж, Научная книга (2018), 98.

Ա. Ս. ԲՈՒՎԱ, Տ. Ի. ՊՐՈՋՈՐԻՆԱ, Է. Գ. ՊՈՏԱՊՈՎԱ

ՄԵԾ ԱԳՐՈԱՐԴՅՈՒՆԱԲԵՐԱԿԱՆ ՏԱՐԱԾԱՇՐՋԱՆՈՒՄ
ԱՊԱԿԵՆՏՐԱՅՎԱԾ ԽՄԵԼՈՒ ՋՐԻ ԱՂԲՅՈՒՐՆԵՐԻ ՈՐԱԿԻ ՀԱՄԱԼԻՐ
ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ՄԻԱՍՆԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴԻ ՓՈՐՁԱՐԿՄԱՆ
ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐ

Ա մ փ ո փ ու մ

Այս ուսումնասիրությունը նվիրված է խմելու ջրի ապակենտրոնացված օգտագործման (DDWU) աղբյուրների վիճակի համալիր գեոէկոլոգիական ախտորոշման միասնական մեթոդաբանության մշակմանը և փորձարկմանը: Որպես մոդելային շրջան ընտրվել է 2,285 մլն բնակչությամբ և զարգացած արդյունաբերական-ագրարային տնտեսական կառուցվածքով Վորոնեժի մարզը:

Առաջարկվող մեթոդիկան հիմնված է խմելու ջրի որակի վերաբերյալ տեղեկատվության հավաքագրման, վերլուծության, մշակման և ներկայացման գիտամեթոդական մոտեցումների վրա, բնակչության առողջության համար բնապահպանական ռիսկերի մակարդակների վրա՝ հիմնված էկոգետոլոգիայի հավանական-վիճակագրական վերլուծության մեթոդների, աշխարհատեղեկատվական մոդելավորման և քարտեզագրման տեխնոլոգիաների վրա:

A. S. BOEVA, T. I. PROZHORINA, E. G. POTAPOVA

RESULTS OF APPROBATION OF THE UNIFIED METHODOLOGY
FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY
OF DECENTRALIZED DRINKING WATER SOURCES
IN A LARGE AGRO-INDUSTRIAL REGION

Summary

The present study is devoted to the development and validation of a unified methodology for integrated geo-ecological diagnostics of the state of sources of decentralized domestic drinking water use. The Voronezh region with a population of 2.285 million people and a developed industrial-agrarian structure of the economy was chosen as a model region.

The proposed methodology is based on a set of scientific and methodological approaches to the collection, analysis, processing and presentation of information on the quality of drinking water, levels of environmental risks to public health based on the methods of probabilistic-statistical analysis of eco-geodata, geoinformation modeling and mapping technologies.