

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ
GEOLOGY. MINERALS

УДК 556.38(476)

Поступила в редакцию 23.10.2025

Received 23.10.2025

**ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ
ФОРМИРОВАНИЯ РЕСУРСОВ И КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ**

В. И. Пашкевич¹, Е. А. Кухарик¹, А. М. Кухарик¹, К. Ю. Балашов²

¹*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь;*

²*Проектное унитарное предприятие «Калийпроект», Солигорск, Беларусь*

Аннотация. В настоящей статье выполнен анализ природных и антропогенных факторов, влияющих на формирование ресурсов и качество подземных вод на территории Беларуси и связанных с ними геоэкологических рисков. К наиболее значимым природным факторам формирования ресурсов подземных вод относятся особенности геологического строения и рельефа земной поверхности, климатические и гидрологические условия. На территории Беларуси величина естественных возобновляемых ресурсов пресных подземных вод составляет 15,9 км³/год (43,56 млн м³/сут). Общий водоотбор подземных вод в настоящее время находится на уровне 2,4–2,5 млн м³/сут. Это свидетельствует о высокой обеспеченности ресурсами пресных подземных вод, как на текущий период, так и на отдаленную перспективу. В последние десятилетия все большее влияние на формирование ресурсов подземных вод оказывают антропогенные факторы, а именно водоотбор подземных вод на групповых водозаборах и одиночных скважинах, водоотлив из карьеров и осушительная мелиорация. Показано, что интенсивная эксплуатация подземных вод приводит к изменению структуры водного баланса на значительных по площади участках, а также к образованию крупных депрессионных воронок до 70 км в поперечнике с понижением уровней подземных вод до 40–60 м в их центральной части.

Охарактеризовано взаимоотношение природных и антропогенных факторов, предопределяющих качество подземных вод на территории Беларуси. Природными факторами обеспечивается формирование мощной толщи (в среднем 250–350 м) пресных подземных вод с относительно невысокой минерализацией – от 15–100 до 300–400 мг/дм³. Антропогенные факторы (промышленное, коммунально-бытовое, сельскохозяйственное, транспортное, радиационное загрязнение, осушительная мелиорация и др.) приводят к существенной трансформации химического состава грунтовых вод, а иногда и более глубокозалегающих напорных подземных вод. Показано, что основными макрокомпонентами антропогенного загрязнения грунтовых вод являются ионы Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺ и др.

Ключевые слова: подземные воды; ресурсы; качество; загрязнение подземных вод; Беларусь.

Для цитирования. Пашкевич В. И., Кухарик Е. А., Кухарик А. М., Балашов К. Ю. Природные и антропогенные факторы формирования ресурсов и качества подземных вод на территории Беларуси // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 100–113.

**NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS
OF THE FORMATION OF GROUNDWATER RESOURCES
AND THEIR QUALITY OF BELARUS**

V. I. Pashkevich¹, E. A. Kukharik¹, A. M. Kukharik¹, K. Yu. Balashov²

¹*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;*

²*Design Unitary Enterprise “Kaliproekt”, Soligorsk, Belarus*

Abstract. This article contains the analysis of the natural and anthropogenic factors influencing the formation of groundwater resources and their quality in Belarus and the associated geoecological risks. The most significant natural factors in the formation of groundwater resources include the features of the geological structure and relief, climatic and

hydrological conditions. In Belarus, the amount of natural renewable fresh groundwater resources is 15.9 km³/year (43.56 million m³/day). The total groundwater extraction is currently at the level of 2.4–2.5 million m³/day. This indicates a high supply of fresh groundwater resources both for the current period and for the long term. In recent decades, anthropogenic factors have increasingly influenced the formation of groundwater resources, specifically groundwater extraction from group and individual wells, quarry dewatering and drainage reclamation. It has been shown that intensive groundwater exploitation leads to changes in the water balance structure over large areas, the formation of large depressions up to 70 km across with groundwater levels dropping to 40–60 m in their central parts.

The relationship between natural and anthropogenic factors determining groundwater quality in Belarus is characterized. Natural factors ensure the formation of a thick layer (averaging 250–350 m) of fresh groundwater with relatively low mineralization – from 15–100 to 300–400 mg/dm³. Anthropogenic factors (industrial, municipal, agricultural, transport, radiation pollution, drainage reclamation, etc.) lead to significant changes in the chemical composition of groundwater, sometimes even deep-lying one. It has been shown that the main macrocomponents of anthropogenic groundwater pollution are Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺ and etc. ions.

Keywords: groundwater; resources; quality; groundwater pollution; Belarus.

For citation. Pashkevich V. I., Kukharik E. A., Kukharik A. M., Balashov K. Yu. Natural and anthropogenic factors of the formation of groundwater resources and their quality of Belarus. *Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 100–113.

Введение. Подземные воды и, прежде всего, воды самой верхней гидродинамической зоны – зоны активного водообмена, содержащей пресные подземные воды, являются важнейшим компонентом геологической среды. Они оказывают прямое или опосредованное влияние на многие другие компоненты окружающей среды, формируя или участвуя в формировании целого ряда весьма существенных геоэкологических рисков для здоровья человека и условий его жизнедеятельности [1].

Беларусь относится к числу тех немногих стран мира, в которых практически все хозяйственно-питьевое водоснабжение базируется на использовании подземных вод. В связи с этим качество пресных подземных вод и количество их ресурсов являются важнейшими составляющими экологической безопасности населения и предпосылкой устойчивого экономического развития страны. Помимо этого, подземные воды оказывают большое влияние на многие другие компоненты окружающей среды, в том числе на условия питания, формирования ресурсов и качества поверхностных вод [2]. В общем речном стоке Беларуси на долю подземных вод приходится 47 %, а в меженные периоды они формируют его практически полностью [3]. На участках неглубокого залегания подземных вод они оказывают решающее влияние на формирование почвенной влажности, степень водообеспечения растительности и условия ее произрастания. Переосушение почв может быть причиной активизации процесса дефляции и возникновения пожаров на торфяниках. Именно подземные воды обуславливают протекание таких современных геологических процессов, как подтопление, заболачивание, суффозия, карстообразование, оползни и др. Все это в совокупности также влияет на формирование благоприятных (комфортных) условий жизнедеятельности человека.

Цель работы – провести анализ природных и антропогенных факторов формирования ресурсов и качества подземных вод на территории Беларуси.

Материалы и методика исследования. При подготовке статьи использованы данные Государственного водного кадастра за 2000–2016 гг. [4–6], фондовые, литературные и авторские материалы гидрогеологических и гидрогеохимических исследований, характеризующие факторы формирования ресурсов и качества подземных вод на территории Беларуси, а также нормативно-правовая документация, регламентирующая качество питьевых вод источников централизованного и нецентрализованного водоснабжения.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим подробно природные и антропогенные факторы, формирующие ресурсы и качество подземных вод на территории Беларуси.

Факторы формирования ресурсов пресных подземных вод. Природные факторы. Природно-климатические условия Беларуси являются благоприятными для формирования на ее территории значительных запасов пресных подземных вод. Большая часть территории страны, за исключением Полесья, находится в зоне избыточного увлажнения с благоприятными условиями инфильтрационного питания. Высокая проницаемость покровных отложений обеспечивает величину инфильтрационного питания водоносных горизонтов зоны активного водообмена, достигающую 10–20 % от количества выпадающих атмосферных осадков [3]. В результате горизонты верхней части зоны активного водообмена на территории Беларуси получают в среднем 16,9 км³/год (46,3 млн м³/сут) инфильтрующихся вод (атмосферных осадков). С учетом подтока подземных вод из более глубоких гидродинамических зон (+0,6 км³/год), а также расходования грунтовых вод на испарение (–1,6 км³/год) *естественные возобновляемые ресурсы пресных подземных вод* на территории страны оцениваются величиной 15,9 км³/год (43,56 млн м³/сут) [3, 4], которая в обобщенном виде отражает естественное питание подземных вод и соответствует объему подземных вод, ежегодно разгружающихся в речную сеть.

Потенциальную возможность использования подземных вод характеризуют прогнозные эксплуатационные ресурсы подземных вод. Их оценивают в зависимости от расхода воды, который может быть

получен водозаборами, расположенными на всей территории конкретного региона. При этом учитывают возможность естественного пополнения подземных вод за счет поверхностных, а также искусственного увеличения питания подземных вод в результате проведения инженерных мероприятий. Прогнозные эксплуатационные ресурсы подземных вод на территории Беларуси оцениваются величиной 18,1 км³/год (49,6 млн м³/сут) [3, 4].

В целом распределение естественных и прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод на территории Беларуси (по административным областям и по речным бассейнам) очень неравномерно и обусловлено характером рельефа, мощностью зоны аэрации, литологическим составом покровных и водовмещающих пород. Большой неоднородностью характеризуется и распределение по площади такого показателя, как отношение величины эксплуатационных ресурсов к естественным, т. е. обеспеченность питанием. Возможности питания подземных вод (от которых зависят объемы эксплуатационных ресурсов) по площади существенно различаются, поскольку модули первых определяются условиями питания водоносных горизонтов, а модули вторых – аккумулялирующими емкостями этих горизонтов и характеристиками их границ [3]. Наименее благоприятные условия для пополнения запасов подземных вод наблюдаются в южной части территории страны, где прогнозные эксплуатационные ресурсы более чем в 1,5 раза превышают естественные, т. е. обеспеченность восполнением за счет последних не превышает 70 % [3]. При недостаточности естественного питания водоотбор может обеспечиваться за счет упругих запасов эксплуатируемых горизонтов или ресурсов, привлекаемых из рек, т. е. за счет поверхностных вод. На участках интенсивной эксплуатации здесь возможно формирование неустановившегося режима фильтрации.

Количество подземных вод и возможность их использования в пределах конкретных месторождений характеризуют *эксплуатационные запасы подземных вод*, которые оцениваются по промышленным (А, В) и перспективным (С₁, С₂) категориям, отражающим степень гидрогеологической разведанности месторождений.

В настоящее время в Беларуси разведано более 240 месторождений подземных вод. Они эксплуатируются групповыми водозаборами, обеспечивающими водоснабжение в основном городов и поселков городского типа. По этим месторождениям утверждены запасы подземных вод и периодически проводится их переоценка. В последние годы активно осуществляется работа по подсчету запасов подземных вод и по одиночным водозаборным скважинам, обеспечивающим водоснабжение многих сельских населенных пунктов и животноводческих ферм. Государственным водным кадастром учтены балансовые эксплуатационные запасы пресных подземных вод в количестве 6,88 млн м³/сут. В целом степень разведанности подземных вод, которая характеризуется отношением утвержденных эксплуатационных запасов к эксплуатационным ресурсам, по состоянию на 1 января 2016 г. составляет 13,0 % [4].

Использование пресных подземных вод для централизованного водоснабжения осуществляется на 177 водозаборах 112 городов, городских поселков и промышленных центров. Общий отбор пресных подземных вод на *водозаборах с утвержденными запасами* в 2016 г. составил 1,34 млн м³/сут. Степень использования разведанных эксплуатационных запасов подземных вод не превышает 22 % [4]. Помимо этого, по данным за разные годы [5, 6], значительных объемов (до 1,1–1,2 млн м³/сут) достигает водоотбор из *неутвержденных запасов*. Таким образом, общий водоотбор может быть оценен величиной 2,4–2,5 млн м³/сут, т. е. около 5 % от прогнозных эксплуатационных ресурсов. Это свидетельствует о высокой обеспеченности Беларуси ресурсами пресных подземных вод, как на текущий период, так и на отдаленную перспективу. Вместе с тем это не исключает актуальности проблем охраны ресурсов и качества подземных вод. Пресные подземные воды относятся к категории *возобновляемых природных ресурсов*. В связи с этим процессы формирования их ресурсов и качества постоянно подвержены влиянию большого числа *природных и антропогенных* факторов.

Наиболее мощным природным фактором, определяющим процессы восполнения ресурсов пресных подземных вод, является *режим выпадения атмосферных осадков, их интенсивности и расхода на испарение*. Наибольшее питание подземных вод имеет место в те периоды года, когда выпадает наибольшее их количество при наименьшем испарении, т. е. осенью и весной, а в некоторые годы и зимой. Размеры же инфильтрационного питания зависят (при равном количестве осадков) от литологического состава пород зоны аэрации, определяющего скорость возможного поглощения атмосферных осадков, а также от глубины залегания подземных вод. Величина инфильтрации (т. е. инфильтрационного восполнения ресурсов подземных вод), а также величина испарения с увеличением глубин залегания зеркала грунтовых вод постепенно уменьшаются. Максимальное испарение из зоны аэрации, величина которого нередко превышает испарение с открытой водной поверхностью, наблюдается на тех участках и в те периоды, когда капиллярная кайма, существующая над зеркалом грунтовых вод, достигает земной поверхности. Такая ситуация наблюдается в пределах болот и переувлажненных земель.

При глубинах залегания грунтовых вод свыше 4–5 м испарение с их поверхности становится весьма незначительным. С увеличением глубин залегания зеркала грунтовых вод амплитуда колебания

их уровней затухает, что можно объяснить рассредоточением процесса питания во времени и балансированием его подземным стоком [7]. Объемы инфильтрации атмосферных осадков до грунтовых вод зависят не только от глубин залегания последних, состава пород зоны аэрации и их фильтрационных свойств, но и от ряда других факторов. Существенно влияют на такие объемы морфологическое строение земной поверхности и микрорельеф, определяющие размеры поверхностного стока и поверхностного задерживания влаги, характер растительности, задернованности или распаханности территории, а также интенсивность выпадения осадков.

Результаты многолетних режимных наблюдений, проводившихся на территории Беларуси [8–10], показывают, что наиболее благоприятными периодами для инфильтрационного питания подземных вод являются осенний и весенний сезоны, несмотря на то что летом выпадает значительно большее количество атмосферных осадков. Это связано с тем, что на интенсивность инфильтрационного питания очень большое влияние оказывает *температура воздуха*. Высокие температуры воздуха летом обуславливают интенсивное расходование выпавших атмосферных осадков на испарение, а также транспирацию растительностью. В зимние сезоны в связи с промерзанием почвы и выпадением осадков в виде снега инфильтрационное питание грунтовых вод происходит лишь эпизодически или вовсе отсутствует. В Беларуси зимние сезоны в целом являются малоблагоприятными для питания подземных вод.

Описанные закономерности процессов формирования ресурсов подземных вод под влиянием таких климатических факторов, как количество и режим выпадения атмосферных осадков, а также температура воздуха, в обязательном порядке должны учитываться при разработке долговременных прогнозов состояния подземных вод в связи с возможными климатическими изменениями и обусловленными ими геоэкологическими рисками.

Тенденции изменения процессов формирования ресурсов подземных вод могут быть совершенно разными в зависимости даже от отдельных деталей сценариев развития климатических изменений. Так, в общем сценарии потепления климата исключительно важным является то, к какому сезону будет приурочено повышение температуры воздуха. Если это летние месяцы, то рост температуры повысит испаряемость и неизбежно приведет к сокращению инфильтрационного питания подземных вод, если зимние месяцы – к сокращению времени промерзания почвы и увеличению периода с благоприятными условиями для инфильтрационного питания подземных вод. Положительным фактором при «зимнем» потеплении климата окажется и изменение структуры осадков в зимние месяцы – увеличение количества жидких осадков и сокращение твердых. Таким образом, к числу сезонов, благоприятных для инфильтрационного питания подземных вод (весенний и осенний), может добавиться еще один – зимний. В целом сценарий «зимнего» потепления можно рассматривать в качестве оптимистического для условий формирования ресурсов подземных вод. Все остальные сценарии потепления климата будут в этом отношении негативными.

Реалистичный сценарий прогноза состояния подземных вод в условиях климатических изменений может быть разработан на основе результатов многолетних (охватывающих несколько десятилетий) наблюдений на гидрологических постах, имеющих на территории Беларуси. Эти результаты свидетельствуют о том, что периодам потепления, т. е. увеличения среднегодовых температур воздуха, всегда соответствовало снижение уровней грунтовых вод разной интенсивности. Таким образом, возможное потепление климата в условиях Беларуси с наибольшей вероятностью будет сопровождаться ухудшением условий формирования ресурсов пресных подземных вод. Это выразится в уменьшении инфильтрационного питания грунтовых вод, снижении их уровней и, в целом, в сокращении объема естественных ресурсов пресных подземных вод.

При оценке процессов формирования ресурсов подземных вод необходимо также учитывать сложную структуру гидродинамических потоков в зоне активного водообмена. В условиях Беларуси она в пределах каждого речного бассейна вписывается в известную схему «междуречного потока» [11]. В соответствии с этой схемой на водораздельных пространствах рек в зоне активного водообмена преобладают нисходящие потоки подземных вод. Это так называемые области питания не только грунтовых, но и более глубокозалегающих напорных водоносных горизонтов. Долины рек являются областями их разгрузки. Большинство эрозионных врезов, каковыми являются долины рек, дренируют не только грунтовые воды, но и межпластовые горизонты пресных подземных вод. Такие закономерности прослеживаются при анализе гидродинамических условий в водоносных горизонтах зоны активного водообмена в пределах каждого детально изученного в гидрогеологическом отношении речного бассейна Беларуси [10, 12].

На формирование ресурсов пресных подземных вод помимо природных факторов в последние десятилетия все большее влияние оказывает большая группа *антропогенных факторов*. К их числу в первую очередь следует отнести водоотбор подземных вод на групповых и одиночных водозаборах, водоотлив из карьеров, а также проведение осушительных мелиораций. В настоящее время в Беларуси эксплуатируется более 30 000 водозаборных скважин. Общий водоотбор из них, как отмечалось

ранее, достигает 2,4–2,5 млн м³/сут. На участках сосредоточенного водоотбора (в первую очередь это групповые водозаборы в городах) формируются значительные по размерам депрессионные воронки, которые охватывают не только эксплуатационный горизонт, но и все залегающие выше горизонты, вплоть до грунтовых вод. В окрестностях крупных городов, имеющих несколько водозаборов, депрессионные воронки могут сливаться в одну общую, образуя весьма значительную по размерам мегадепрессию. Так, в районе г. Минска в верхнепротерозойском водоносном комплексе сформировалась депрессионная воронка размером 40 км × 70 км с понижением уровня подземных вод в центральной части до 50–60 м. В вышезалегающем днепровско-сожском водоносном комплексе здесь также сформировалась депрессионная воронка размером до 40 км в диаметре с понижением уровня подземных вод до 25–30 м [3, 13]. В центральной части воронки произошло сработка и горизонта грунтовых вод, в результате чего сократился, а на некоторых участках и полностью прекратился сток малых рек – притоков р. Свислочи (реки Переспа, Слепянка, Лошица и др.).

Интенсивная эксплуатация водозаборов в г. Гродно привела к формированию в альбско-сеноманском водоносном горизонте депрессионной воронки, диаметр которой достигает 40 км со снижением уровня подземных вод до 25 м. Столь же обширная депрессионная воронка диаметром до 40 км сформировалась в верхнепротерозойском водоносном комплексе в зоне влияния водозаборов г. Барановичи. Понижение уровней подземных вод в ее центре достигает 30–40 м и более. Этой воронке соответствует депрессия в горизонте грунтовых вод с понижениями уровня до 7–11 м [3]. Таким образом, интенсивная эксплуатация подземных вод способна приводить к изменению структуры водного баланса на значительных по площади участках.

В последние два десятилетия в Беларуси отчетливо проявилась тенденция сокращения объема водопотребления как населением, так и промышленностью. Это обусловлено широким внедрением приборного учета потребления воды и постепенным увеличением ее стоимости для потребителей. За период 1996–2016 г. отбор проб подземных вод на водозаборах с утвержденными запасами сократился с 1,85 до 1,34 млн м³/сут [3, 4]. Как следствие, уменьшается и негативное влияние интенсивного водоотбора на уровенный режим грунтовых и поверхностных вод. В зонах влияния депрессионных воронок групповых водозаборов при уменьшении водоотбора происходит частичное восстановление (подъем) уровней подземных вод. Такие процессы наблюдаются, например, в восточной части водозабора «Новинки», которая находится на территории г. Минска. Во многих его скважинах в последние десятилетия наблюдаются высокие уровни нитратного загрязнения. После того как эти скважины из-за загрязнения выводятся из эксплуатации, происходит постепенный подъем уровней грунтовых вод на прилегающей территории. В районе улиц М. Богдановича – Сурганова – Л. Карастояновой (территория, прилегающая к бывшей Минской болотной опытной станции) такой подъем уровней грунтовых вод в значительной степени осложнил строительство здесь новых жилых домов, в частности не позволил осуществить запланированное сооружение в них подземных гаражей.

В Беларуси к числу антропогенных факторов, оказывающих широкомасштабное воздействие на подземные воды, относится *осушительная мелиорация*. В настоящее время в стране осушено более 3 млн га болот и заболоченных земель, что привело к существенной перестройке процессов формирования режима и баланса подземных вод на мелиорированных землях.

На большей части существующих мелиоративных систем из-за технического несовершенства не удается обеспечивать поддержание оптимальных уровней грунтовых вод и влажности почвы. Как следствие, в Белорусском Полесье в пределах мелиоративных систем пересушено от 20 до 60 % их площади [10]. В маловодные годы снижение уровней грунтовых вод на прилегающей к мелиоративным системам территории в Полесском регионе прослеживается на расстоянии до 3–4 км. В центральных и северных районах Беларуси, где в составе покровных отложений преобладают супеси и суглинки, зона влияния значительно меньше и составляет 0,1–0,8 км [10]. Все это приводит к ухудшению условий ведения на этой территории сельскохозяйственной деятельности, пересыханию колодцев в сельских населенных пунктах и, в целом, обуславливает снижение уровня комфортности и условий жизнедеятельности населения.

Осушительные мелиорации оказывают существенное влияние на формирование *баланса грунтовых вод*. При снижении их среднегодового уровня с глубины от 0,3–0,5 до 1,5–2,0 м происходит резкое сокращение испарения. Инфильтрация начинает преобладать над испарением, а боковой отток – над притоком. Это приводит к формированию слоя подземного стока, величина которого в песчаных отложениях (именно они преобладают в Белорусском Полесье в составе покровных отложений) может достигать 100–130 мм. Происходит усиление подземного стока в реки и водность возрастает. В то же время почвы в пределах таких мелиоративных систем испытывают острый дефицит влаги [10].

Несколько иначе баланс грунтовых вод трансформируется при осушении земель с преобладанием в составе покровных отложений супесей и суглинков. Здесь снижение уровней приводит лишь к незначительному увеличению инфильтрационного питания грунтовых вод и, как следствие, небольшому

увеличению бокового оттока грунтовых вод. Подземный сток в реки на мелиорированных водосборах с преобладанием супесчаных и суглинистых отложений возрастает незначительно.

На основании этих зависимостей элементов баланса от глубины залегания грунтовых вод можно определить критическую глубину залегания грунтовых вод, переход через которую приводит к коренному изменению структуры баланса. В песчаных отложениях она изменяется от 0,5 м в многоводные годы до 1,3 м в маловодные, а в супесчаных отложениях колеблется от 2 до 4 м [14].

На основе балансовых исследований могут быть оценены величины и характер изменения естественных ресурсов грунтовых вод. Максимальных значений (300–400 мм/год, или 9,5–12,7 л/с/км²) они достигают при глубинах залегания уровня грунтовых вод 1,5–2,5 м ниже земной поверхности. В песчаных отложениях минимальные ресурсы (около 200 мм/год, или 6,33 л/с/км²) формируются при глубине залегания уровня до 0,5 м и более 3,5 м, а в супесчаных отложениях (80 мм/год, или 2,5 л/с/км²) при залегании уровня грунтовых вод в интервале глубин 3,5–4,0 м [14].

Балансовыми расчетами [14] установлено, и это является принципиально важным, что поддержание проектной нормы осушения (порядка 0,8 м ниже земной поверхности) и оптимального водно-воздушного режима в корнеобитаемом слое растений невозможно без дополнительной подачи воды на увлажнение из гарантированного источника, находящегося вне мелиоративной системы. В пределах бассейна р. Припять, при условии поддержания уровня воды в среднем на глубине 0,8 м от земной поверхности, в годы с обеспеченностью осадками от 35 до 64 % на дополнительное увлажнение корнеобитаемого слоя требуется 40–60 мм слоя воды (400–600 м³/га). В маловодные годы (при обеспеченности атмосферными осадками от 65 до 80 %) потребность в воде возрастает до 1000 м³/га. В многоводные годы (при обеспеченности осадками от 1 до 34 %) возникает необходимость сброса воды с мелиоративной системы до 300–400 м³/га/год. На мелиоративных системах, построенных на супесчаных отложениях, для поддержания оптимального водно-воздушного режима в корнеобитаемом слое требуется дополнительно прилекать около 500 м³/га воды [14].

Таким образом, состояние подземных вод на мелиорируемых землях оказывает решающее влияние на эффективность работы осушительных систем. В свою очередь, оно в огромной степени зависит как от режима их эксплуатации, так и от климатических факторов (количества осадков, температуры воздуха и др.).

В последние три десятилетия в Беларуси резко сократились объемы нового мелиоративного строительства. В основном ставится задача поддержания в рабочем состоянии действующих осушительных систем. В связи с этим описанное влияние осушительной мелиорации на состояние подземных вод в ближайшие десятилетия будет стабильным и геозэкологические риски, обусловленные данным фактором, не будут усиливаться.

Факторы формирования качества подземных вод. Как было показано ранее, Беларусь обладает весьма значительными ресурсами пресных подземных вод, которые многократно превышают ее потребности, причем как в настоящее время, так и на отдаленную перспективу. В связи с этим основные проблемы при использовании их ресурсов напрямую связаны не с количеством, а с *качеством подземных вод*.

Формирование химического состава пресных подземных вод Беларуси происходит в результате сложного процесса взаимодействия разнообразных *природных и антропогенных факторов*. Это климатические (количество атмосферных осадков и их состав, температура воздуха и др.), геологические, гидрогеологические и геоморфологические (состав покровных и водовмещающих отложений, характер динамики подземных вод, заболоченность территории, особенности рельефа земной поверхности), а также большая группа антропогенных (промышленное, коммунально-бытовое, сельскохозяйственное и другие виды загрязнений, осушительная мелиорация и т. д.) факторов [1].

Природные факторы. Геологический разрез покровных отложений на территории Беларуси в целом характеризуется хорошей проницаемостью, что наряду с гумидным климатом региона обуславливает формирование в верхней гидродинамической зоне – зоне активного водообмена – мощной толщи подземных вод с относительно невысокой минерализацией – от 15–100 до 300–400 мг/дм³, редко более. Мощность этой толщи в пределах Беларуси изменяется от 150–250 до 350–450 м и лишь в крайней ее юго-западной части в пределах Брестского артезианского бассейна достигает 1000 м. Минимальные мощности зоны пресных подземных вод (150–200 м) фиксируются в пределах долин рек Березины и Западной Двины [13, 15].

Химический состав пресных подземных вод, которые используются для нужд хозяйственно-питьевого водоснабжения, характеризуется чрезвычайно большим разнообразием геохимических типов и большой изменчивостью во времени. В первую очередь это касается подземных вод первого от поверхности безнапорного водоносного горизонта – *грунтовых вод*. Именно на этом горизонте оборудовано абсолютное большинство источников *нецентрализованного водоснабжения* – шахтных колодцев и неглубоких (до 10–15 м) скважин на частных подворьях. В *естественных условиях*, т. е. на участках, где

отсутствуют источники сельскохозяйственного, коммунально-бытового, промышленного или какого-либо другого вида антропогенного загрязнения, грунтовые воды имеют, как правило, *гидрокарбонатный магниево-кальциевый* состав¹. Основными макрокомпонентами антропогенного загрязнения грунтовых вод являются хлор-ион (Cl^-), нитрат-ион (NO_3^-), сульфат-ион (SO_4^{2-}), натрий-ион (Na^+) и калий-ион (K^+). Поступление их в различных сочетаниях в грунтовые воды на участках антропогенного загрязнения обуславливает формирование широкого спектра геохимических типов грунтовых вод: *хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатных, нитратно-хлоридно-гидрокарбонатных натриево-магниево-кальциевых, кальцево-натриевых* и многих других.

Уровни антропогенного загрязнения грунтовых вод по перечисленным компонентам часто превышают значения предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных для питьевых вод источников нецентрализованного водоснабжения [17]. Наиболее часто такое превышение фиксируется для нитрат-иона (NO_3^-). При уровне ПДК для нитрат-иона, равном 45 мг/дм^3 , в водах колодцев его содержание нередко достигает $100\text{--}200 \text{ мг/дм}^3$, а в отдельных случаях – $300\text{--}500 \text{ мг/дм}^3$ и более [18]. Характер распределения содержания нитрат-ионов в пресных подземных водах в зависимости от глубины показан на рис. 1. Превышение уровней ПДК в водах колодцев нередко наблюдается также по Cl^- ($>350 \text{ мг/дм}^3$), Na^+ ($>200 \text{ мг/дм}^3$) и общей минерализации ($>1000 \text{ мг/дм}^3$). Часто эти воды неблагоприятны и по *микробиологическим показателям*.

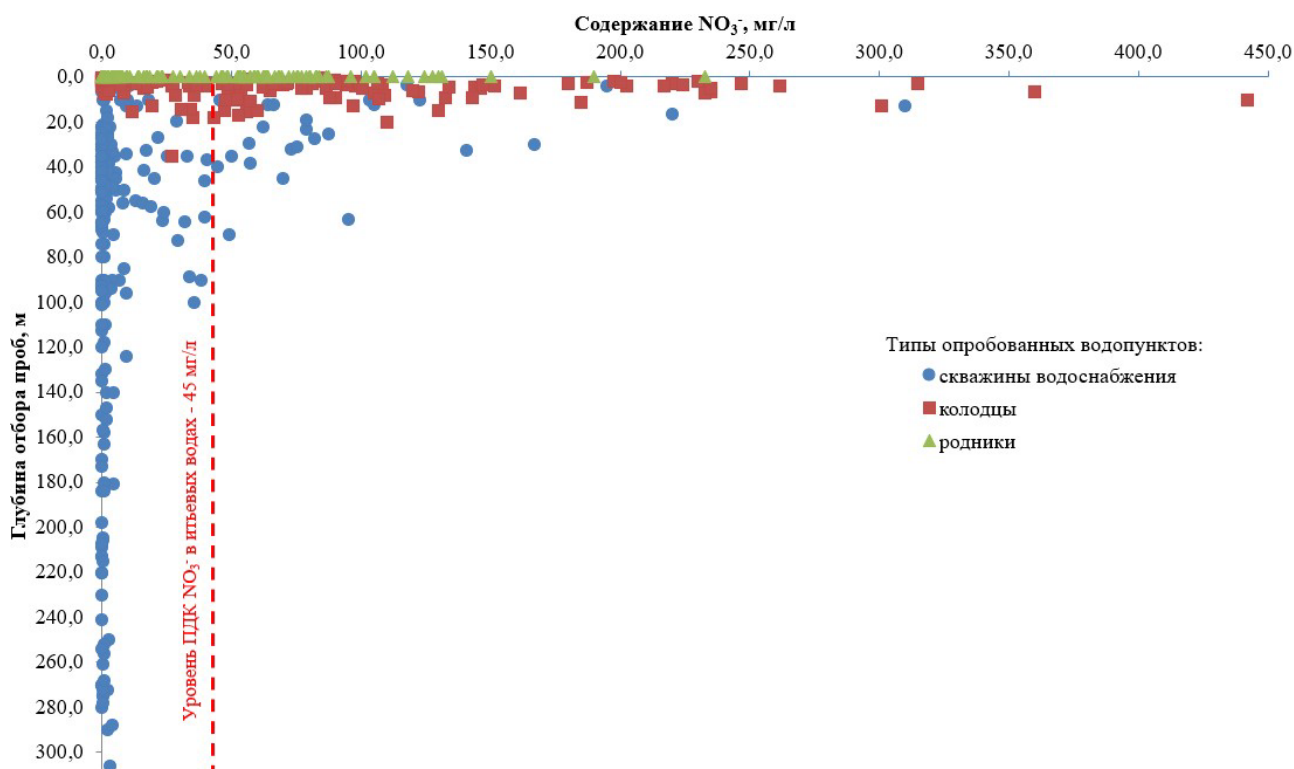


Рис. 1. Распределение содержания нитратов (NO_3^-) в пресных подземных водах на территории Центральной Беларуси в зависимости от глубины

Fig. 1. Distribution of nitrate contamination in fresh groundwater of the Central Belarus depending on the depth

Высокие уровни антропогенного загрязнения являются причиной загрязнения не только колодцев, но и *родников*, поскольку именно грунтовые воды служат основным источником их питания. На тех участках, где в зоне водного (грунтового) питания родников имеются источники сельскохозяйственного или коммунально-бытового загрязнения, содержание нитратов (NO_3^-) в родниковых водах

¹ В соответствии с ОСТ 41-05-263-86 [16] в названиях сложных геохимических типов воды анионы и катионы перечислены в порядке увеличения их концентраций, выраженных в мг-экв/дм³.

может достигать 80–120 мг/дм³. Превышение допустимых уровней по нитратам фиксируется не менее чем в 20 % всех обследованных родников [19]. Это обстоятельство также обуславливает один из значимых *геоэкологических рисков*, так как воды многих родниковых источников население активно использует в питьевых целях.

В отличие от горизонта грунтовых вод, в подземных водах более глубоких напорных водоносных горизонтов следы антропогенного загрязнения наблюдаются значительно реже. Именно на эти горизонты ориентированы все системы *централизованного водоснабжения* и на них оборудованы десятки тысяч водозаборных артезианских скважин групповых и одиночных водозаборов в городах, городских поселках и сельских населенных пунктах.

По химическому составу напорные подземные воды на территории Беларуси являются в основном *гидрокарбонатными магниево-кальциевыми* с минерализацией от 50–150 до 300–400 мг/дм³ и лишь в нижней части зоны пресных подземных вод на границе с минерализованными они приобретают *гидрокарбонатный натриевый* состав. Их минерализация возрастает при этом до 600–800 мг/дм³.

По химическому составу напорные подземные воды в основном соответствуют требованиям, предъявляемым к водам хозяйственно-питьевого назначения по большинству нормируемых показателей. Исключения составляют часто повышенные содержания в них водорастворенного железа (в форме Fe²⁺ и Fe³⁺). Содержание железа (Fe_{общ}) в водах нередко достигает 1,5–3,0 мг/дм³ и более, что значительно превышает уровень ПДК, установленный для этого компонента – 0,3 мг/дм³. На территории Центральной Беларуси превышение уровней ПДК по железу фиксируется в водах 50–70 % всех артезианских скважин групповых и одиночных водозаборов. Высоким содержаниям железа в подземных водах часто сопутствуют повышенные содержания марганца – до 0,5–0,8 мг/дм³ при уровне ПДК, равном 0,1 мг/дм³. Это обуславливает необходимость строительства на водозаборах подземных вод систем их обезжелезивания и деманганации. В водах относительно глубоких горизонтов (девонском и верхнепротерозойском), имеющих гидрокарбонатный натриевый состав, часто фиксируются повышенные содержания фтора (F⁻) – до 2–4 мг/дм³ при уровне ПДК 1,5 мг/дм³. Характер распределения содержания фтора в пресных подземных водах в зависимости от глубины показан на рис. 2. В этих водах нередко отмечаются также повышенные содержания В и Ва [15].

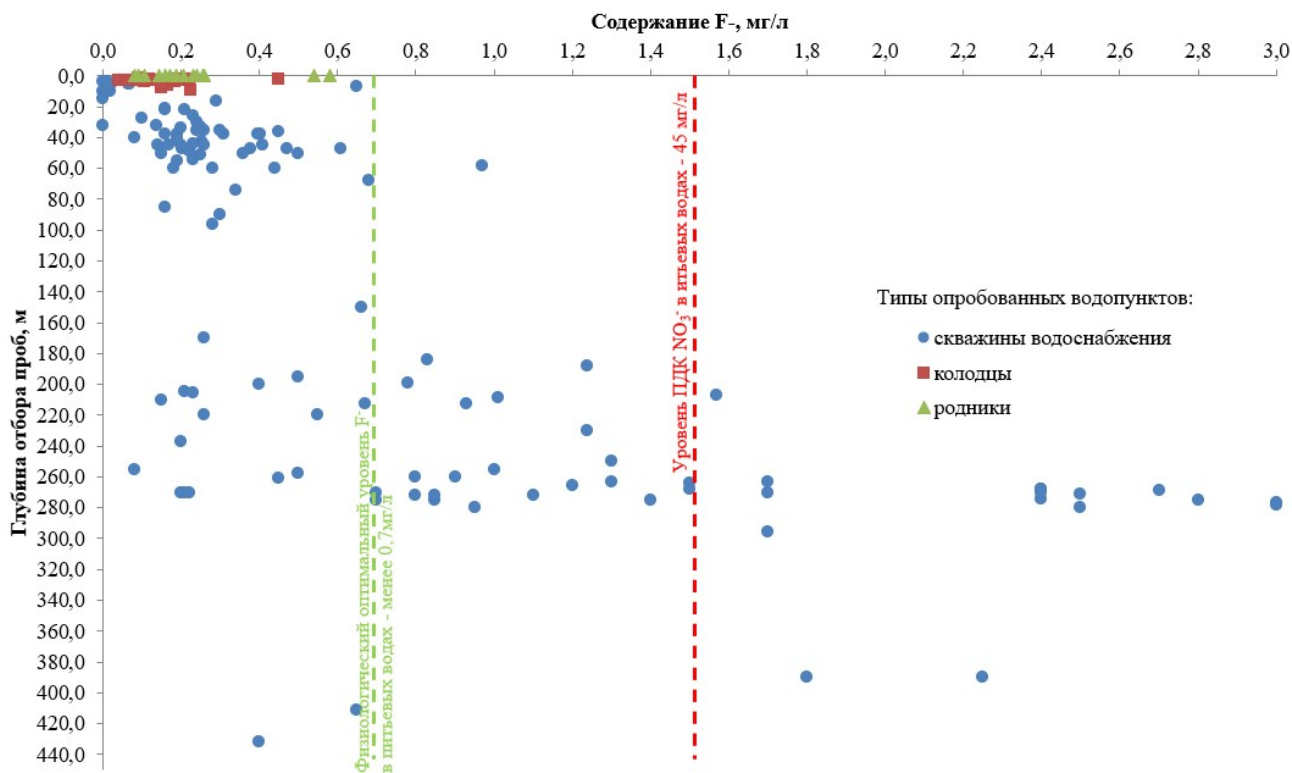


Рис. 2. Распределение содержания фтора (F⁻) в пресных подземных водах на территории Центральной Беларуси в зависимости от глубины

Fig. 2. Distribution of fluoride contamination in fresh groundwater of the Central Belarus depending on the depth

Повышенное содержание в подземных водах указанных компонентов (Fe, Mn, F, B, Ba), обусловлено в основном природными факторами [15]. Так, накоплению железа в грунтовых водах благоприятствует болотная геохимическая среда, характеризующаяся отсутствием кислорода и высоким содержанием водорастворенных органических веществ (гуминовых и фульвокислот). Как следствие, имеет место прямая корреляционная зависимость между степенью заболоченности территории и частотой встречаемости повышенных содержаний железа не только в грунтовых водах, но и в подземных водах более глубоких водоносных горизонтов зоны активного водообмена [20].

На качество подземных вод, используемых для питьевых целей, негативное влияние могут оказывать не только повышенные, но и *чрезмерно низкие содержания* некоторых компонентов. Так, для фтора (F^-) физиологически оптимальное содержание составляет от 0,5 до 1,5 мг/дм³ [17]. Между тем в подавляющем числе скважин и колодцев содержание данного компонента не превышает 0,2–0,3 мг/дм³. Геохимической причиной этого является преобладающий в Беларуси гидрокарбонатный кальциевый состав пресных подземных вод, который препятствует накоплению в них фтора (F^-). Данное обстоятельство также может быть отнесено к числу весьма значимых *геоэкологических рисков* для здоровья населения.

В последние десятилетия на процессы формирования химического состава подземных и, прежде всего, грунтовых вод все большее влияние оказывает *антропогенное загрязнение*. Такие его виды, как *промышленное* и *коммунально-бытовое*, часто приводят к значительной трансформации химического состава *грунтовых вод*, а нередко и более глубоководных *напорных подземных вод*. Однако они проявляются в основном лишь в пределах промышленных площадок предприятий и на селитебных территориях, т. е. на сравнительно небольших площадях. В отличие от них *сельскохозяйственное загрязнение* характеризуется меньшей интенсивностью, но охватывает огромные площади сельскохозяйственных угодий и таким образом, является не локальным, а *региональным*. Очень часто различные виды и площади загрязнений накладываются друг на друга. Так, например, на коммунально-бытовое загрязнение в сельских населенных пунктах повсеместно накладывается сельскохозяйственное, а в городах – промышленное и транспортное.

Сельскохозяйственное загрязнение. Анализ гидрогеохимических материалов по качеству грунтовых вод Беларуси свидетельствует о том, что на площади практически всех сельскохозяйственных земель, где вносятся минеральные или органические удобрения, естественный гидрогеохимический фон грунтовых вод существенно нарушен. В первую очередь это выражается в росте содержания в водах таких компонентов, как NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ , и некоторых других. В пределах старопахотных земель, где применение минеральных и органических удобрений имеет длительную историю, в грунтовых водах (выборка из 456 анализов) особенно значительно возрастают концентрации NO_3^- – в среднем от 1,2 до 41,6 мг/дм³, Cl^- – от 5,6 до 43,8, SO_4^{2-} – от 4,9 до 32,3, Na^+ – от 3,6 до 15,7, Ca^{2+} – от 2,8 до 30,0, K^+ – от 1,2 до 7,8 мг/дм³. При этом общая минерализация грунтовых вод возрастает в среднем от 215,7 до 356,7 мг/дм³, однако геохимический тип воды остается по-прежнему в основном гидрокарбонатным кальциевым, но с повышенным содержанием NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} и Na^+ . В отличие от старопахотных земель, несколько иная гидрогеохимическая ситуация складывается в пределах мелиорированных (осушенных) территорий. В целом осушение приводит к весьма значительной перестройке процессов формирования режима, баланса и химического состава грунтовых вод. Процесс собственно осушения (до начала применения удобрений) сопровождается ростом минерализации грунтовых вод, главным образом за счет ионов SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} и реже HCO_3^- . На осушенных землях грунтовые воды в приповерхностной зоне в результате окислительной деструкции торфа часто приобретают сульфатный кальциевый состав, совершенно не характерный для пресных подземных вод Беларуси. На стадии сельскохозяйственного использования осушенных земель дальнейшая глубокая трансформация химического состава грунтовых вод связана с применением удобрений [21].

Участками особенно интенсивного сельскохозяйственного загрязнения грунтовых вод являются животноводческие фермы и поля орошения животноводческими стоками. Загрязнение выражается здесь в росте содержания в воде нитратов (до 80–150 мг/дм³), аммония (до 5–18 мг/дм³), хлоридов (до 100–180 мг/дм³) и других компонентов [15]. На таких участках загрязнение часто не только прослеживается в грунтовых водах, но и проникает в напорный водоносный горизонт, особенно при относительно неглубоком (25–35 м) его залегании и отсутствии в его кровле достаточно мощной толщии водоупорных пород. Такие гидрогеологические условия часто характерны для межморенного днепровско-сожского водоносного горизонта на территории Минского, Борисовского и Молодечненского районов. Как следствие, во многих артезианских скважинах, расположенных на животноводческих фермах, здесь в настоящее время фиксируются высокие уровни нитратного загрязнения (до 80–120 мг/дм³).

Коммунально-бытовое загрязнение. В пределах сельских и городских населенных пунктов химический состав грунтовых, а нередко и напорных подземных вод трансформируется под влиянием

коммунально-бытового загрязнения. Оно формируется за счет утечек из выгребных ям и канализационных систем, поступления в подземные воды загрязненных стоков с полей фильтрации и свалок бытовых отходов. В пределах сельских населенных пунктов этому загрязнению, как правило, сопутствует сельскохозяйственное (приусадебные участки, скотоводческие фермы и др.), а в городах на коммунально-бытовое загрязнение накладывается промышленное. Основными компонентами коммунально-бытового загрязнения являются азотистые соединения (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+), хлориды и сульфаты, синтетические моющие средства и многие другие соединения. Коммунально-бытовые стоки характеризуются исключительно высокими уровнями микробиологического загрязнения.

В выборке из 485 анализов, характеризующих химический состав грунтовых вод в пределах сельских населенных пунктов и малых городов (колодцы и неглубокие скважины), средняя минерализация достигает $698,5 \text{ мг/дм}^3$, т. е. более чем в 3 раза превышает средний естественный геохимический фон грунтовых вод Беларуси, а геохимический облик этих вод трансформируется с *гидрокарбонатного кальциевого* в *гидрокарбонатно-нитратно-хлоридный кальциево-натриевый* с повышенным содержанием K^+ . Воды колодцев нередко имеют неудовлетворительное качество также из-за повышенной минерализации (более 1000 мг/дм^3), общей жесткости (более 10 мг-экв/дм^3) содержания хлоридов (более 350 мг/дм^3). Однако наиболее часто из разряда кондиционных их выводят повышенные содержания *нитратов* (более 45 мг/дм^3). В выборке из 1029 анализов среднее содержание нитратов в водах колодцев составляет $150,9 \text{ мг/дм}^3$ (более 3 ПДК), а максимальное достигает $1000\text{--}2490 \text{ мг/дм}^3$. В целом воды 82 % всех опробованных колодцев содержат нитраты в количествах, превышающих уровни ПДК. Часто эти воды неблагоприятны и по микробиологическим показателям.

Колодцами в Беларуси продолжает пользоваться значительная часть сельского населения и многие жители небольших городов и городских поселков. Неудовлетворительное качество питьевой воды из-за нитратного загрязнения (нитраты относятся к токсикологическим показателям вредности) обуславливает весьма существенные *геоэкологические риски для здоровья населения*, а качество сельского водоснабжения следует считать одной из острейших экологических проблем Беларуси.

К категории коммунально-бытового загрязнения относится также загрязнение подземных вод, формирующееся в пределах свалок (полигонов твердых отходов) и очистных сооружений коммунальных служб. Так, в грунтовых водах зон влияния полигонов твердых бытовых отходов г. Минска содержится обширный комплекс тяжелых металлов 1–3-го классов опасности: бериллий, ванадий, хром (полигон «Северный» – до 1233 мкг/дм^3 при ПДК, равной 500 мкг/дм^3), марганец (полигон «Тростенец» – до 215 мкг/дм^3 при ПДК, равной 100 мкг/дм^3), кобальт, никель (полигон «Тростенец» – до 199 мкг/дм^3 при ПДК, равной 100 мкг/дм^3 , полигон «Северный» – до 576 мкг/дм^3), медь, цинк, мышьяк, селен, молибден, кадмий (полигон «Северный» – до $1,89 \text{ мкг/дм}^3$ при ПДК, равной 1 мкг/дм^3), барий и свинец, источниками которых являются фильтраты свалочного субстрата отходов [15].

Промышленное загрязнение. В отличие от сельскохозяйственного и коммунально-бытового загрязнения, которые охватывают весьма обширные площади (пахотные земли, приусадебные участки, селитебные территории), промышленное загрязнение проявляется в основном на локальных участках, однако по многим компонентам оно своей интенсивностью их превосходит. В целом перечень компонентов промышленного загрязнения исключительно разнообразен и определяется главным образом характером производства и перечнем веществ, применяемых либо образующихся в технологических процессах. На предприятиях машиностроения и металлообработки это нефтепродукты, тяжелые металлы; на предприятиях пищевой промышленности – органические вещества, хлориды и др.

На многих автозаправочных станциях, *промышленных площадках предприятий, в местах хранения нефтепродуктов* вследствие их утечек и аварийных разливов часто фиксируется загрязнение нефтепродуктами не только почвогрунтов, но и грунтовых вод. Такое загрязнение наблюдается почти на 50 % обследованных объектов [4]. В некоторых случаях на участках особенно интенсивных утечек и аварийных разливов на зеркале грунтовых вод формируются линзы утерянных нефтепродуктов, общая масса которых может достигать десятков и сотен тонн. Такие случаи были зафиксированы на Минском тракторном заводе, Борисовском шпалопропиточном заводе, в Брестском локомотивном депо, на Молодечненской нефтебазе и других объектах [15]. Учитывая тот факт, что для нефтепродуктов установлен очень жесткий уровень ПДК в питьевых водах ($0,1 \text{ мг/дм}^3$), даже самое малое их количество, поступившее в горизонт грунтовых вод, создает значительную экологическую угрозу для систем питьевого водоснабжения, ориентированных на подземные воды.

Обширный комплекс высокотоксичных *тяжелых металлов* фиксируется в грунтовых водах на участках размещения полигонов промышленных отходов г. Минска: марганец – до $308\text{--}9416 \text{ мкг/дм}^3$ (МТЗ–МПКО, «Прудиче»), кобальт – до 124 (МТЗ–МПКО), никель – до 1351, цинк – до 2008, кадмий – до 7 мкг/дм^3 при ПДК, равной 1 мкг/дм^3 [15].

В пределах *Осиповичского подземного хранилища газа* (ПХГ) утечки природного газа из пласта-коллектора и поступление его в вышележающие водоносные горизонты обуславливают протекание

в подземных водах ряда специфических геохимических процессов с накоплением в них сероводорода (H_2S) [15]. В некоторых населенных пунктах в зоне влияния Осиповичского ПХГ в водах колодцев и скважин водоснабжения содержание сероводорода достигает $1,2\text{--}3,4\text{ мг/дм}^3$ при уровне ПДК в питьевых водах $0,003\text{ мг/дм}^3$ [17].

На территории Беларуси ярким примером промышленного загрязнения подземных вод является техногенный ореол в районе калийных комбинатов ОАО «Беларуськалий». В *Солигорском горнопромышленном районе* на площади более 100 км^2 сформировалась зона *хлоридно-натриевого засоления подземных вод*, которая охватывает не только горизонт грунтовых вод, но и межморенные водоносные горизонты, неогеновый, палеогеновый и меловой водоносные комплексы. Загрязнение здесь прослеживается до глубины $100\text{--}120\text{ м}$. Наиболее высокие уровни характерны для грунтовых вод. При этом наблюдается их постоянный рост. Так, если в 2007 г. максимальная минерализация грунтовых вод вблизи солейотвалов составляла $113,2\text{ г/дм}^3$, в 2008 г. – $128,5$, в 2010 г. – $173,6$, в 2012 г. – $195,0$, то в 2017 г. она уже достигала $224,0\text{ мг/дм}^3$. Загрязнение подземных вод явилось причиной выхода из строя ряда ведомственных скважин водоснабжения ОАО «Беларуськалий». Хлоридно-натриевое загрязнение (часто выше уровней ПДК) наблюдается также во многих колодцах сельских населенных пунктов на территории Солигорского горнопромышленного района. В связи с активным строительством новых калийных рудников (Нежинский, Петриковский ГОК) и расширением площадей, занимаемых объектами хвостового хозяйства (солейотвалы и шламохранилища) масштабы загрязнения пресных подземных вод и обусловленные этим геоэкологические риски будут здесь неизбежно возрастать.

Антропогенное загрязнение (сельскохозяйственное, коммунально-бытовое, промышленное и другие его виды) с наибольшей интенсивностью проявляется в горизонте грунтовых вод. Однако на некоторых участках оно захватывает и более глубокие горизонты напорных подземных вод, на которых оборудованы водозаборные скважины групповых и одиночных водозаборов. Как отмечалось ранее, в пределах групповых водозаборов формируются значительные по размерам депрессионные воронки. Их гидродинамической особенностью являются активные нисходящие перетоки из горизонта грунтовых вод в более глубокие горизонты, которые эксплуатируются на данных водозаборах. В таких условиях оказывается возможным особенно быстрое поступление загрязнения из грунтовых вод в напорные водоносные горизонты. В последние десятилетия такое загрязнение все чаще фиксируется на водозаборах г. Минска (водозаборы «Новинки», «Зеленовка»), Борисова («Лядище»), г. Жодино («Восточный»), г. Гродно («Гожка»), г. Новополоцка («Окунево»), г. Новогрудка («Валовка») и других городов, а также во многих ведомственных одиночных водозаборных скважинах промышленных предприятий. Наиболее часто такое загрязнение проявляется в виде повышенных содержаний в воде нитратов – до $60\text{--}120\text{ мг/дм}^3$ при уровне ПДК 45 мг/дм^3 . Вследствие высоких уровней нитратного загрязнения некоторые скважины групповых водозаборов («Новинки» в г. Минске) и одиночных водозаборов в ряде сельских населенных пунктов в Борисовском, Слуцком, Молодечненском и других районах выводятся из эксплуатации. Помимо нитратов, в водах артезианских скважин, испытывающих антропогенное загрязнение, часто фиксируется высокая общая жесткость – до $9,0\text{--}11,0\text{ мг-экв/дм}^3$ (при допустимом уровне $7,0\text{ мг-экв/дм}^3$), повышенные содержания аммония (NH_4^+) – до $4,0\text{--}10\text{ мг/дм}^3$ (ПДК – $2,6\text{ мг/дм}^3$), а также тяжелых металлов (Сг, As, Pb и др.). Высокое аммонийное (NH_4^+) загрязнение подземных вод наблюдалось на водозаборах в г. Жодино («Восточный»), г. Барановичи («Волохва» и «Щара-1»), г. Гродно («Пышки») и г. Новополоцке («Окунево»). Особенно высокий уровень такого загрязнения имел место на водозаборе «Северный» г. Орши. Здесь в начале 1990-х годов содержание аммония (NH_4^+) в водах эксплуатируемого водоносного горизонта в некоторых скважинах достигало 52 мг/дм^3 при ПДК $2,6\text{ мг/дм}^3$. По этой причине данный водозабор был ликвидирован, а эксплуатационные запасы подземных вод по нему были исключены из Государственного водного кадастра. Это стало первым в Беларуси случаем ликвидации крупного городского водозабора по причине сформировавшегося на нем высокого антропогенного загрязнения подземных вод.

Потенциально опасным источником загрязнения подземных вод являются *радиоактивные выбросы от аварии на Чернобыльской атомной электростанции*. Площадь сформировавшегося в результате этой аварии поверхностного загрязнения (свыше 1 Ки/км^2 по ^{137}Cs) в пределах Беларуси составляет около 47 тыс. км^2 . Однако покровные отложения и почвы в целом обеспечивают достаточно высокую защищенность подземных вод от проникновения радиоактивных веществ с поверхности. Наблюдаемые в настоящее время уровни загрязнения грунтовых вод по ^{137}Cs относительно невелики (до $0,2\text{--}1,0\text{ Бк/дм}^3$ при ПДК, равной 10 Бк/дм^3), хотя и превышают доаварийные уровни. ^{90}Sr -активность грунтовых вод достигает $0,5\text{--}1,7\text{ Бк/дм}^3$ при ПДК, равной $0,37\text{ Бк/дм}^3$ [15]. Загрязнение грунтовых вод радиостронцием до уровней, превышающих допустимый, зафиксировано лишь в ближней 30-километровой зоне Чернобыльской атомной электростанции. В более глубоких напорных водоносных горизонтах, эксплуатируемых водозаборными скважинами, следов опасного радиоактивного загрязнения не наблюдается [15].

Заключение. Пресные подземные воды, приуроченные к зоне активного водообмена, являются важнейшим компонентом геологической среды Беларуси, ценным и широко используемым полезным ископаемым. В стране практически все хозяйственно-питьевое водоснабжение базируется на использовании подземных вод, что ставит в ряд первоочередных задач гидрогеологии на современном этапе комплексное изучение природных и антропогенных факторов формирования их ресурсов и качества.

К наиболее значимым природным факторам формирования ресурсов подземных вод в Беларуси относятся геолого-геоморфологические, климатические и гидрогеологические условия. В совокупности они определяют величину естественных возобновляемых ресурсов пресных подземных вод на территории страны на уровне 15,9 км³/год (43,56 млн м³/сут), прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод, оцениваемых в 18,1 км³/год (49,6 млн м³/сут), а также балансовых эксплуатационных запасов пресных подземных вод в количестве 6,88 млн м³/сут. Общий водоотбор в настоящее время достигает 2,4–2,5 млн м³/сут. Приведенные данные свидетельствуют о высокой обеспеченности Беларуси ресурсами пресных подземных вод, как на текущий период, так и на отдаленную перспективу.

К числу важнейших антропогенных факторов, влияющих на формирование ресурсов пресных подземных вод, относятся водоотбор подземных вод на групповых и одиночных водозаборах и проведение осушительных мелиораций. В настоящее время в Беларуси эксплуатируется более 30 000 водозаборных скважин. В местах сосредоточенного водоотбора (прежде всего, это групповые водозаборы в городах) формируются крупные депрессионные воронки, охватывающие не только эксплуатационный, но и все горизонты, залегающие выше, вплоть до грунтовых вод. Крупные депрессионные воронки имеют диаметр до 70 км, в их пределах понижение уровня подземных вод достигает 40–60 м. Воздействие осушительной мелиорации проявляется в существенной перестройке процессов формирования режима и баланса подземных вод на мелиорированных землях, что с учетом технического несовершенства дренажных систем часто не позволяет обеспечить поддержание оптимальных уровней грунтовых вод и влажности почв.

Группу природных факторов, определяющих формирование химического состава пресных подземных вод Беларуси, составляют климатические (количество атмосферных осадков и их состав, температура воздуха и др.), геологические, гидрогеологические и геоморфологические (состав покровных и водовмещающих отложений, характер динамики подземных вод, заболоченность территории, особенности рельефа земной поверхности). Под их влиянием обеспечивается формирование мощной (в среднем 250–350 м) толщи подземных вод с относительно невысокой минерализацией – от 15–100 до 300–400 мг/дм³.

Под влиянием большой группы антропогенных факторов (промышленное, коммунально-бытовое, сельскохозяйственное, транспортное, радиационное загрязнение, осушительная мелиорация и др.) происходит существенная трансформация качественного состава грунтовых вод, а нередко и более глубокозалегающих напорных подземных вод. В подземных водах формируются повышенные и иногда аномально высокие содержания NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, K⁺, Na⁺, тяжелых металлов, нефтепродуктов и других веществ, представляющие риск для здоровья населения.

Список использованных источников

1. Пашкевич, В. И. Гидрогеологические факторы, определяющие комфортность среды обитания человека на территории Центральной Беларуси / В. И. Пашкевич, Е. А. Кухарик, А. М. Кухарик // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 131–137. – DOI: 10.47612/2079-3928-2025-1-131-137.
2. Пашкевич, В. Гидроминеральные ресурсы / В. Пашкевич, О. Васнева // Наука и инновации. – 2025. – № 3 (264). – С. 11–15.
3. Полезные ископаемые Беларуси: к 75-летию БелНИГРИ / П. З. Хомич, С. П. Гудак, А. М. Синичка (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2002. – 528 с.
4. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2016 год) / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, М-во здравоохранения Респ. Беларусь, РУП «ЦНИИКИВР». – Минск, 2017. – 172 с.
5. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2000 год) / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, Гос. комитет по гидрометеорологии, М-во здравоохранения Респ. Беларусь. – Минск, 2001. – 113 с.
6. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2007 год) / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, М-во здравоохранения Респ. Беларусь, РУП «ЦНИИКИВР». – Минск, 2008. – 92 с.
7. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика / И. К. Гавич, В. С. Ковалевский, Л. С. Язвин [и др.]; отв. ред. И. С. Зекцер. – Новосибирск : Наука, 1983. – 242 с.

8. Козлов, М. Ф. Гидрогеология Припятского Полесья : в 2 т. / М. Ф. Козлов ; под ред. Г. В. Богомолова. – Минск : Наука и техника, 1977. – Т. II. – 272 с.
9. Козлов, М. Ф. Количественная оценка питания грунтовых вод в северной части Припятского Полесья / М. Ф. Козлов, Я. М. Шилинская. – Минск : Наука и техника, 1972. – 96 с.
10. Гидрогеологическая экспертиза широкомасштабных осушительных мелиораций Белорусского Полесья / А. В. Кудельский, А. М. Гречко, Т. Д. Кривецкая, В. И. Пашкевич ; под ред. А. А. Хомича. – Минск : Наука и техника, 1993. – 111 с.
11. Гидрогеология / В. М. Шестаков, И. Ф. Фиделли, И. С. Зекцер [и др.] ; под ред. В. М. Шестакова, М. С. Орлова. – М. : МГУ, 1984. – 315 с.
12. Жогло, В. Г. Система численных геофильтрационных моделей верхнего этажа гидrolитосферы юго-востока Республики Беларусь / В. Г. Жогло ; под ред. В. И. Пашкевича. – Минск : Ин-т геол. наук НАН Беларуси, 2001. – 177 с.
13. Кудельский, А. В. Подземные воды Беларуси / А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич, М. Г. Ясовеев ; под ред. В. С. Усенко. – Минск : Ин-т геол. наук НАН Беларуси, 1998. – 260 с.
14. Гречко, А. М. Закономерности режима подземных вод юго-восточной части Белорусского Полесья в условиях осушительной мелиорации : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 04.00.06 / Гречко Анатолий Михайлович ; Ин-т геохимии и геофиз. АН БССР. – Минск, 1987. – 20 с.
15. Кудельский, А. В. Региональная гидрогеология и геохимия подземных вод Беларуси / А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич. – Минск : Бел. наука, 2014. – 271 с.
16. Воды подземные, классификация по химическому составу и температуре. Отраслевой стандарт. Издание официальное : ОСТ 41-05-263-86. – Введ. 12.05.86. – М. : ВСЕГИНГЕО, 1986. – 12 с.
17. Об утверждении гигиенических нормативов («Показатели безопасности питьевой воды», с. 187–225) : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 25 янв. 2021 г. № 37 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система. – URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=c22100037> (дата обращения: 29.10.2025).
18. Пашкевич, В. И. Условия формирования нитратного загрязнения грунтовых вод Беларуси / В. И. Пашкевич // Природопользование и охрана окружающей среды – 2000 : сб. ст. / редкол.: И. И. Лиштван (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ИПИПРЭ НАН Беларуси, 2000. – С. 30–31.
19. Пашкевич, В. И. Гидрогеохимическое разнообразие родниковых источников на территории Беларуси / В. И. Пашкевич // Актуальные вопросы эффективного и комплексного использования водных ресурсов : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., приуроч. ко Всемирному дню водных ресурсов, Минск, 22–24 марта 2023 г. / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, РУП «ЦНИИКИВР» ; отв. ред. О. В. Ковзунова. – Минск : Нац. б-ка Беларуси, 2023. – С. 62–64.
20. Пашкевич, В. И. Геохимия подземных вод зоны активного водообмена восточной части Белорусского Полесья в связи с мелиорацией : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 04.00.06 / Пашкевич Василий Иванович ; ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии. – М., 1986. – 22 с.
21. Пашкевич, В. И. Влияние осушительных мелиораций на формирование химического состава грунтовых вод / В. И. Пашкевич // Формирование подземных вод под влиянием антропогенных факторов : сб. науч. ст. / под ред. А. В. Кудельского. – Минск : Наука и техника, 1990. – С. 73–86.

References

1. Pashkevich V. I., Kukharik E. A., Kukharik A. M. *Gidrogeologicheskie faktory, opredelyayushchie komfortnost' sredi obitaniya cheloveka na territorii Tsentral'noi Belarusi* [Hydrogeological factors determining the comfort of the human habitat in the territory of Central Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 131–137. DOI: 10.47612/2079-3928-2025-1-131-137. (in Russian)
2. Pashkevich V., Vasneva O. *Gidromineral'nye resursy* [Hydromineral resources]. *Nauka i innovatsii = Science and Innovations*, 2025, no. 3 (264), pp. 11–15. (in Russian)
3. Khomich P. Z., Gudak S. P., Sinichka A. M. (eds.) [et al.] *Poleznye iskopaemye Belarusi: k 75-letiyu BelNIGRI* [Minerals of Belarus: to the 75th anniversary of BelNIGRI]. Minsk, Adukatsyya i vykhavanne Publ., 2002. 528 p. (in Russian)
4. *Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Vodnye resursy, ikh ispol'zovanie i kachestvo vod (za 2016 god)* [State Water Cadastre. Water Resources, Their Use and Water Quality (for 2016)]. – Minsk, 2017. – 172 p. (in Russian)
5. *Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Vodnye resursy, ikh ispol'zovanie i kachestvo vod (za 2000 god)* [State Water Cadastre. Water Resources, Their Use and Water Quality (for 2000)]. – Minsk, 2001. – 113 p. (in Russian)
6. *Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Vodnye resursy, ikh ispol'zovanie i kachestvo vod (za 2007 god)* [State Water Cadastre. Water Resources, Their Use and Water Quality (for 2007)]. – Minsk, 2008. – 92 p. (in Russian)
7. Gavich I. K., Kovalevskii V. S., Yazvin L. S. [et al.] *Osnovy gidrogeologii. Gidrogeodinamika* [Fundamentals of Hydrogeology. Hydrogeodynamics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 242 p. (in Russian)
8. Kozlov M. F. *Gidrogeologiya Pripyatskogo Poles'ya: v 2 t.* [Hydrogeology of the Pripyat Polesie: in 2 vol.]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1977, vol. II, 272 p. (in Russian)
9. Kozlov M. F., Shilinskaya Ya. M. *Kolichestvennaya otsenka pitaniya gruntovykh vod v severnoi chasti Pripyatskogo Poles'ya* [Quantitative assessment of groundwater recharge in the northern part of the Pripyat Polesie]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1972, 96 p. (in Russian)
10. Kudelsky A. V., Grechko A. M., Krivetskaya T. D., Pashkevich V. I. *Gidrogeologicheskaya ekspertiza shirokomashtabnykh osushitel'nykh melioratsii Belorusskogo Poles'ya* [Hydrogeological examination of large-scale drainage melioration of the Belarusian Polesie]. Minsk, Navuka i Tekhnika Publ., 1993, 111 p. (in Russian)

11. Shestakov V. M., Fidelli I. F., Zektser I. S. [et al.] *Gidrogeologiya* [Hydrogeology]. Moscow, MGU Publ., 1984, 315 p. (in Russian)
12. Zhoglo V. G. *Sistema chislennykh geofil'tratsionnykh modelei verkhnego etazha gidrolitosfery yugo-vostoka Respubliki Belarus'* [System of numerical geofiltration models of the upper level of the hydrolithosphere of the south-east part of the Republic of Belarus]. Minsk, In-t geol. nauk NAN Belarusi Publ., 2001, 177 p. (in Russian)
13. Kudelsky A. V., Pashkevich V. I., Yasoveev M. G. *Podzemnye vody Belarusi* [Groundwater of Belarus]. Minsk, In-t geol. nauk NAN Belarusi, 1998, 260 p. (in Russian)
14. Grechko A. M. *Zakonomernosti rezhima podzemnykh vod yugo-vostochnoi chasti Belorusskogo Poles'ya v usloviyakh osushitel'noi melioratsii. Avtoref. dis. kand. geol.-mineral. nauk* [Regularities of the groundwater regime in the south-eastern part of the Belarusian Polesie under drainage melioration conditions. Abstract Ph.D geol.-mineral. sci.]. Minsk, 1987, 20 p. (in Russian)
15. Kudelsky A. V., Pashkevich V. I. *Regional'naya gidrogeologiya i geokhimiya podzemnykh vod Belarusi* [Regional hydrogeology and geochemistry of groundwater in Belarus]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2014. 217 p. (in Russian)
16. *Vody podzemnye, klassifikatsiya po khimicheskomu sostavu i temperature. Otrasleyoi standart. Izdanie ofitsial'noe (OST 41-05-263-86, vved. 12.05.1986)* [Groundwater, classification by chemical composition and temperature. Industry standard. Official publication (OST 41-05-263-86, introduced 12.05.1986)]. Moscow, VSEGINGEO Publ., 1986, 12 p. (in Russian)
17. On approval of hygiene standards ("Drinking Water Safety Indicators", pp. 187–225) [Electronic resource]. – URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=c22100037> (date of access: 29.10.2025).
18. Pashkevich V. I. *Usloviya formirovaniya nitratnogo zagryazneniya gruntovykh vod Belarusi* [Conditions of formation of groundwater nitrate pollution in Belarus]. *Prirodopol'zovanie i okhrana okruzhayushchei sredy – 2000. Sbornik statei* [Nature management and environmental protection – 2000. Collection of articles]. Minsk, IPIPRE NAN Belarusi Publ., 2000, pp. 30–31. (in Russian)
19. Pashkevich V. I. *Gidrogeokhimicheskoe raznoobrazie rodnikovykh istochnikov na territorii Belarusi* [Hydrogeochemical diversity of spring sources on the territory of Belarus]. *Aktual'nye voprosy effektivnogo i kompleksnogo ispol'zovaniya vodnykh resursov: sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, priurochennoi ko Vsemirnomu dnyu vodnykh resursov* [Topical issues of efficient and integrated use of water resources: collection of materials of the international scientific and practical conference, dedicated to the World Water Day]. Minsk, 2023, pp. 62–64. (in Russian)
20. Pashkevich V. I. *Geokhimiya podzemnykh vod zony aktivnogo vodoobmena vostochnoi chasti Belorusskogo Poles'ya v svyazi s melioratsiei. Avtoref. dis. kand. geol.-mineral. nauk* [Geochemistry of groundwater in the active water exchange zone of the eastern part of the Belarusian Polesie due to the land reclamation. Abstract Ph.D geol.-mineral. sci.]. Moscow, 1986, 22 p. (in Russian)
21. Pashkevich V. I. *Vliyanie osushitel'nykh melioratsii na formirovanie khimicheskogo sostava gruntovykh vod* [The influence of drainage melioration on the formation of the groundwater chemical composition]. *Formirovanie podzemnykh vod pod vliyaniem antropogennykh faktorov. Sbornik nauchnykh statei* [Formation of groundwater under the influence of anthropogenic factors. Collection of articles]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1990, pp. 73–86. (in Russian)

Информация об авторах

Пашкевич Василий Иванович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: v.i.pashkevich@tut.by

Кухарик Евгений Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией современной геодинамики и палеогеографии, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: shzhk@mail.ru

Кухарик Анна Михайловна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: anyahomich@mail.ru

Балашов Константин Юрьевич – старший научный сотрудник, проектное унитарное предприятие «Калийпроект» ул. Коржа, 5, 223710, г. Солигорск, Беларусь). E-mail: balashovkj@gmail.com

Information about the authors

Vasily I. Pashkevich – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: v.i.pashkevich@tut.by

Evgeniy A. Kukharik – Ph. D (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Head of the Laboratory of Modern Geodynamics and Paleogeography, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: shzhk@mail.ru

Anna M. Kukharik – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: anyahomich@mail.ru

Konstantin Yu. Balashov – Senior Researcher, Design Unitary Enterprise "Kaliproekt" (5, Korzha Str., 223710, Solihorsk, Belarus). E-mail: balashovkj@gmail.com