



ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология
Гидрогеология
Геокриология



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2025

Районирование территории на Северо-Западе Москвы по степени карстово-суффозионной опасности <i>Е. Р. Романова, Ф. К. Буфеев</i>	3
--	---

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Оценка проявлений радона на гидротермальных месторождениях Быстринского района Камчатского края <i>В. А. Кудряшов</i>	19
Сезонная динамика химического состава грунтовых вод в дельте реки Меконг <i>М. В. Болгов, А. К. Кулик, Н. Ч. Хиен, В. Т. М. Чау, Ч. Т. Л. Тху, Р. Н. Балкушкин, А. А. Выприцкий, А. А. Васильченко</i>	35

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Гидрохимическая характеристика природных вод в верхнем течении р. Кубань <i>Т. В. Реутова, Ф. Р. Дреева, Н. В. Реутова</i>	42
---	----

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

Барьеры безопасности и их применение при проектировании полигонов ТКО <i>В. Г. Заиканов, И. Н. Заиканова</i>	56
Лабораторные исследования физических свойств органических отходов, прошедших стадию компостирования <i>Е. С. Соломатина, Г. А. Зарницын, Т. В. Маликова</i>	67

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Теплопроводность городских рыхлых приповерхностных отложений и покрытий <i>Д. Ю. Демежко, Н. Р. Факаева, А. А. Горностаева, Б. Д. Хацкевич</i>	73
---	----

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ влияния природных и техногенных факторов на плотность потока радона в Москве с применением методов машинного обучения <i>С. Г. Гаврильев, Т. Б. Петрова, П. С. Микляев, Е. А. Карфидова</i>	81
---	----

CONTENTS

No. 2, 2025

Zoning the territory in the northwest of Moscow according to the degree of karst and suffosion hazard <i>E. R. Romanova, F. K. Bufeov</i>	3
--	---

NATURAL AND TECHNONATURAL PROCESSES

Assessment of radon manifestation at hydrothermal deposits of the Bystrinsky district, Kamchatka <i>V. A. Kudryashov</i>	19
Seasonal dynamics of groundwater chemical composition in the Mekong River delta <i>M. V. Bolgov, A. K. Kulik, N. Ch. Hiep, V. T. M. Chau, Ch. T.L. Tkhu, R. N. Balkushkin, A. A. Vypritsky, A. A. Vasilchenko</i>	35

ENVIRONMENT CONTAMINATION

Hydrochemical characteristics of natural waters in the uppercourse of the Kuban River <i>T. V. Reutova, F. R. Dreeva, N. V. Reutova</i>	42
--	----

UTILIZATION AND DISPOSAL OF WASTE

Safety barriers and their use in design of municipal solid waste landfills <i>V. G. Zaikanov, I. N. Zaikanova</i>	56
Laboratory studies of physical properties of pre-composted organic waste <i>E. S. Solomatina, G. A. Zarnitsyn, T. V. Malikova</i>	67

SOIL AND ROCK ENGINEERING AND MECHNICS

Thermal conductivity of loose urban soils <i>D. Yu. Demezhko, N. R. Fakaeva, A. A. Gornostaeva, B. D. Khatskevich</i>	73
--	----

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

Analysis of the influence of natural and anthropogenic factors on radon flux density in Moscow using machine learning methods <i>S. G. Gavriliev, T. B. Petrova, P. S. Miklyaev, E. A. Karfidova</i>	81
---	----

УДК 551.435.8

РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ МОСКВЫ ПО СТЕПЕНИ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ

© 2025 г. Е. Р. Романова^{1,2,*}, Ф. К. Буфеев^{1,3,**}

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Ярославское шоссе 26, Москва, 129337 Россия

³ Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе,
Миклухо-Маклая 23, Москва, 117997

*E-mail: romanova.elizaveta.r@yandex.ru

**E-mail: fbuffeev@mail.ru

Поступила в редакцию 15.01.2024 г.

После доработки 15.10.2024 г.

Принята в печать 25.12.2024 г.

Изучение карстово-суффозионной опасности в процессе инженерно-геологических изысканий и разработка противокарстовых мероприятий на объектах, расположенных на территории Москвы, крайне актуальная тема. Согласно “Карте опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов”, участок площадью 4.9 км² на северо-западе г. Москва, в пределах которого в XX в. зафиксированы все известные на территории города карстово-суффозионные проявления, относится к опасной категории. В статье детально анализируются инженерно-геологические условия этого участка по результатам изучения буровых журналов и колонок более 440 скважин. Составлена карта мощности глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт, в масштабе 1 : 5 000. Предложен новый подход к районированию территории по степени карстово-суффозионной опасности, в результате чего в пределах Москвы площадь участка, относящегося к территории опасной в карстово-суффозионном отношении, уменьшается до 2.50 км².

Ключевые слова: карст, воронка, карстово-суффозионный провал, поверхностные проявления, карстово-суффозионная опасность, районирование

DOI: 10.31857/S0869780925020019 EDN: EPFZEG

ВВЕДЕНИЕ

Один из наиболее актуальных вопросов при производстве инженерно-геологических изысканий на территории Москвы — оценка опасности территории в отношении развития “карстовых деформаций”. При этом в соответствии с требованиями нормативов к карстовым деформациям относят и проявления карста, и проявления, образованные в результате совместного протекания карстового и суффозионного процессов (которое исследователи называют “карстово-суффозионным” процессом [1]), а иногда и только суффозионного. В соответствии с СП 22.13330.2016 “Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*”: “к закарстованным относятся территории, в пределах которых распространены водорастворимые породы”. Территория Москвы

полностью относится к области распространения карбонатных отложений, которые хотя и очень медленно, но растворяются. Однако скорость их растворения такова, что в масштабах срока службы сооружения увеличение размера карстовой полости не играет значительной роли в подготовке и протекании процесса провалообразования и выходе провала на земную поверхность [1, 21]. Гораздо существеннее то, что карбонатные породы каменноугольного возраста длительное время испытывали денудационное воздействие, находясь на поверхности земли (или в непосредственной близости от нее) с конца палеозоя и до середины мезозоя, а также большую часть кайнозоя. В то время карстовый процесс развивался очень активно, в результате чего в настоящее время имеется достаточно большое количество проявлений кар-

ста в каменноугольных породах, погребенных под относительно мощной толщей преимущественно дисперсных мезо-кайнозойских отложений, в которых развито несколько водоносных горизонтов (в том числе напорных).

Новые проявления карстово-суффозионного процесса на территории Москвы не фиксируются уже более 25 лет. Несмотря на это, при изменении инженерно-геологических условий, возможна активизация процесса [20]. Важно отметить, что отнесение территории к той или иной категории опасности в карстово-суффозионном отношении влечет за собой как изменение объемов инженерно-геологических изысканий, так и затрат на проектирование и реализацию противокарстовых мероприятий. Очевидно, что это в значительной степени влияет на стоимость проекта в целом.

ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЕ НА ТЕРРИТОРИИ МОСКВЫ

На территории Москвы подземные проявления карста были установлены еще в первой четверти прошлого века в процессе бурения скважин. В начале 1930-х годов многочисленные подземные проявления карста также встречались при прокладке первых линий метрополитена и иных сооружений. При освоении подземного пространства города инженер-геологами и строителями были обнаружены разрушенные зоны в карбонатных массивах, многочисленные трещины, мелкие карстовые полости, каналы, воронки и котловины на поверхности каменноугольных отложений [16]. Однако все зафиксированные проявления карста были лишь подземными.

Карст на территории города связан с наличием в разрезе мощной толщи карбонатных отложений каменноугольного возраста, которые повсеместно перекрыты породами мезозойской и кайнозойской эры. История геологического развития, а именно длительность континентальных перерывов в осадконакоплении в пермское, триасовое и раннеюрское время, а также в палеогене и неогене привели к тому, что практически вся толща каменноугольных карбонатных отложений неравномерно закарстована.

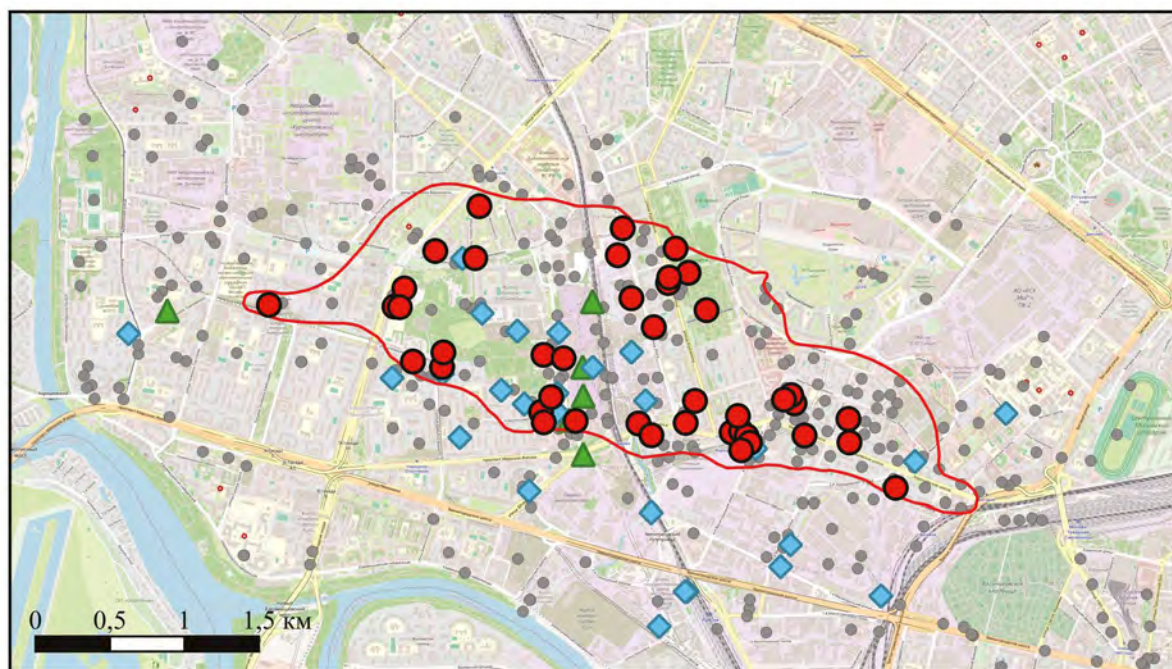
До середины прошлого века при изучении экзогенных геологических процессов карстово-суффозионному процессу не придавалось большого значения. В 1930-е годы были задокументированы первые поверхностные проявления карста, а в 1960-х на северо-западе города начали регулярно возникать провалы и локальные оседания земной поверхности. Высокая интенсивность провалообразования стала диктовать новые условия для безопасного освоения территории и, следовательно, привела к необходимости изучения причин, условий и факторов развития этих явлений.

Принято считать, что к концу прошлого века на территории города зафиксировано 42 поверхностных проявления карстово-суффозионного процесса [1, 2, 11, 12]. Однако в их число входит также 3 понижения земной поверхности неустановленного генезиса [10] (рис. 1). Из 42 проявлений комплексом инженерно-геологических (включая бурение) и геофизических методов изучено 14, на участках их формирования были построены геолого-гидрогеологические разрезы [11]. Провалы зафиксированы вдоль Хорошевского шоссе, около улиц 3-й Хорошевской, Куусинена, Зорге, Берзарина, Маршала Тухачевского и Народного ополчения. Образование некоторых провалов на территории жилой застройки привело к аварийным ситуациям и необходимости проведения мероприятий по ликвидации последствий. Например, в октябре 1969 г. в центре и под южной стеной жилого 5-этажного здания, расположенного по адресу Хорошевское шоссе, д. 35, к. 2, образовались два провала диаметрами 4.5 и 4 м и глубиной 3.5 и 3 м соответственно, что привело к выселению жителей дома, необходимости обеспечения их жильем, сносу дома и рекультивации площадки [3].

В результате всестороннего анализа в 1984 г. главными причинами, способствующими активизации карстово-суффозионных процессов, были названы [8]:

- усиленные откачки подземных вод из закарстованных известняков в промышленных целях, в результате которых на территории Москвы создалась большая депрессионная воронка, изменившая гидрогеологический режим;
- отсутствие или недостаточная мощность водонепроницаемого слоя юрских глин, отделяющего водонасыщенные четвертичные отложения от закарстованных известняков, вследствие чего возникает вертикальная фильтрация подземных вод в закарстованные горизонты известняков;
- значительные скорости фильтрации подземных вод эксплуатируемых водоносных горизонтов и др.;
- вскрытые полости в отложениях каменноугольной системы.

В начале прошлого века пьезометрическая поверхность трещинно-карстовых вод вблизи Москвы-реки почти совпадала с уровнем грунтовых вод, а к концу 1950-х годов откачки привели к снижению напора на 20–30 м в районе Магистральных улиц, Звенигородского шоссе и на 30–40 м в районе Хорошевского и Ленинградского шоссе. К середине 1960-х режим стабилизировался [2], однако провалообразование прекратилось только к концу века. Согласно исследованиям, проведенным при изучении условий образования карстово-суффозионных явлений в районе Хорошевского шоссе



Условные обозначения

- | | |
|---|--|
| ▲ скважины, в которых выявлены
заполненные карстовые полости | □ граница территории «опасной»
по проявлению современных
карстово-суффозионных процессов |
| ◆ скважины, в которых выявлены
пустоты | ● карстово-суффозионные воронки,
провалы и мутьды оседания |
| ● скважины без проявлений | |

Рис. 1. Схема расположения скважин с подземными проявлениями карста.

инженерно-геологической оползневой партией гидрорежимной экспедиции в составе С.И. Парфенова, В.В. Данилова, И.В. Батуриновской и др., на 1975 г. суммарный водоотбор из нижнекаменноугольного водоносного горизонта составил 10800 м³/сут (водозабор «Октябрьское поле»), из среднекаменноугольного водоносного горизонта — 28000 м³/сут, а из верхнекаменноугольного водоносного горизонта — 1000 м³/сут, причем большинство водозаборных скважин работали в весенне-летнее время.

С момента возникновения потенциальной опасности для инфраструктуры, жизни и здоровья населения появились работы по изучению механизма провалообразования, причин и условий появления провалов, районированию территории по степени карстовой опасности [2, 3, 11–13, 15], вносились изменения в существующую нормативную базу. В 1984 г. территорию города по степени опасности поделили на опасную, потенциально опасную и неопасную по таким признакам, как наличие подземных и поверхностных проявлений, степень

закарстованности и трещиноватости, мощность водоупора, градиент вертикальной фильтрации, наличие древних погребенных и доледниковых долин, наличие в разрезе переотложенных более молодых отложений, состояние и свойства песчано-глинистых четвертичных отложений [8]. Однако карта районирования территории Москвы, основанная на вышеперечисленных признаках, не была составлена.

Последняя крупная работа по районированию (она же первая и единственная на сегодняшний день карта районирования), используемая всеми без исключения московскими инженерами-геологами — Карта опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов (М. 1 : 10 000), составлена была в 2012 г. Институтом геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН совместно с ГБУ Мосгоргеотрест [9]. На ней территория города поделена на опасную, потенциально опасную и неопасную по «опасности древних карстовых и современных карстово-суффозионных форм». Критериями для выделения категории опас-

ности современных карстово-суффозионных процессов послужили: наличие/отсутствие на земной поверхности проявлений в виде воронок и муть оседания; приуроченность к доледниковым и современным речным долинам; отсутствие, прерывистость и мощность слабопроницаемого слоя глинистых пород, разделяющего грунтовые и трещинно-карстовый водоносные горизонты. Согласно этой карте, практически вся территория города относится к неопасной или потенциально опасной категориям, к опасной отнесен лишь небольшой участок площадью 4,9 км², в пределах которого и образовались все поверхностные проявления. С 2012 г. новых масштабных работ по составлению карт районирования не проводилось, а имеющаяся карта не актуализировалась, несмотря на увеличение количества скважин в базах данных организаций, участвовавших в ее создании.

Все теоретические предложения по районированию территории города по степени карстово-суффозионной опасности включают критерии, большинство из которых практически невозможно определить при стандартном наборе инженерно-геологических исследований. Авторы карты считают, при *“районировании территории по опасности современных карстово-суффозионных процессов на опасных и потенциально опасных участках при формировании градиента вертикальной фильтрации 3 и более возможна активизация карстово-суффозионных процессов”* [9], однако сам градиент в районировании не был учтен.

Для построения карты районирования всего города необходимо использовать критерии, которые можно получить из архивных материалов без проведения дополнительных исследований. Среди предложенных критериев районирования наиболее легко оцениваемым без дополнительных изысканий является, бесспорно, мощность глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт. При этом граничные значения мощности для каждой категории опасности — вопрос до сих пор дискуссионный.

Первый и наиболее известный подход к районированию территории по степени карстово-суффозионной опасности с учетом мощности глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт, описан в *“Инструкции по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-суффозионных процессов”* [8]. Согласно этой методике, к опасным следует относить территории с мощностью перекрывающих глинистых отложений менее 3 м, к потенциально опасным — территории с мощностью 3–10 м, к неопасным — с мощностью более 10 м. До изменений №4 от 27.12.2021 в СП 22.13330.2016 использовалась аналогичная градация.

Второй подход к районированию, учитывающий мощность глинистых перекрывающих отложений, предложен А.Д. Кочевым, Л.Г. Чертковым и И.Л. Зайонцем в статье *“Карстово-суффозионные процессы на территории г. Москвы и проблемы оценки их опасности”* [13]. Авторы указанной работы после детального анализа условий образования поверхностных проявлений карста и упомянутых выше методик районирования предложили к опасным относить территории с мощностью перекрывающих глинистых отложений менее 5 м, к потенциально опасным — с мощностью 5–12 м, к неопасным — с мощностью более 12 м.

Целями данного исследования являются разработка нового подхода к районированию территорий по степени карстово-суффозионной опасности и уточнение карты районирования участка на северо-западе Москвы, ранее отнесенного к опасному по степени карстово-суффозионной опасности.

Природные условия территории

При выполнении настоящей работы авторы использовали данные об инженерно-геологических условиях участка, который при масштабе исследований 1 : 10 000 по степени опасности современных карстово-суффозионных процессов, полностью относится к опасной категории [9].

Исследуемая территория находится на западе города и имеет площадь 4,9 км². В геоморфологическом отношении территория располагается преимущественно в пределах III (ходьинской) надпойменной террасы Москвы-реки. Кроме того, в пределах этого участка выделяется крупная погребенная дочетвертичная долина, в которой мезозойские отложения локально размыты.

В геологическом строении принимают участие отложения четвертичной, юрской и каменноугольной систем. Четвертичные отложения распространены повсеместно и представлены техногенными грунтами, аллювиальными отложениями II (мневниковской) и III надпойменных террас и высокой поймы, ледниковыми отложениями московского горизонта. Отложения четвертичной системы представлены связными и несвязными грунтами суммарной мощностью от 20 до 50 м. Отложения юрской системы распространены на большей части территории и представлены глинистыми грунтами. Каменноугольная система представлена отложениями верхнего и среднего отделов. Верхний отдел представлен не выдержанным по площади и мощности чередованием карбонатных пород (известняками и изредка доломитами) и глин, а средний отдел — карбонатными отложениями.

На территории развиты надморенный и надюрский водоносные комплексы, а также водоносные горизонты в отложениях каменноугольной

системы. Надморенный водоносный комплекс распространен локально, абсолютные отметки уровня составляют 137–142 м, горизонт безнапорный. Надбюрский водоносный комплекс распространен практически повсеместно, абсолютные отметки уровня изменяются от 128 до 140 м, горизонт напорно-безнапорный, в местах отсутствия водоупора, отделяющего его от вод каменноугольных отложений, происходит объединение этих водоносных горизонтов. Водоносные горизонты каменноугольной системы приурочены к перхуровским, ратмировским и подольско-мячковским отложениям.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В базе данных инженерно-геологических скважин ИГЭ РАН в границах зоны, определенной как опасная с позиций оценки опасности современных карстово-суффозионных процессов [9], содержится информация о 589 скважинах, среди них 229 вскрыли кровлю отложений каменноугольной системы. Данные большинства этих скважин использовались при построении карты [9]. В базе данных ГБУ “Мосгоргеотрест” под данным на 2024 г. в границах исследуемого участка имеется 395 скважин, вскрывших закарстованный горизонт. При этом 176 скважин дублируются в двух базах, 53 скважины есть только в базе данных ИГЭ РАН, 219 скважины есть только в базе данных ГБУ “Мосгоргеотрест”. Таким образом, в анализе используются данные по 448 скважинам, вскрывшим первый от поверхности закарстованный горизонт. При площади участка 4.9 км² плотность данных составляет 91 выработку на 1 км².

Так как, согласно СП 446.1325800.2019 “Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ” (таблица 6.1), такая плотность горных выработок при III категории сложности инженерно-геологических условий (именно III категория сложности присвоена исследуемому участку из-за наличия поверхностных проявлений карстово-суффозионного процесса) дальнейшие картографические построения проводились в масштабе инженерно-геологической съемки 1 : 5 000.

Для анализа были использованы буровые журналы и колонки 448 скважин, расположенных в границах исследуемой зоны, и 215 скважин, вскрывших первый от поверхности закарстованный горизонт в пределах зоны 250 м за ее границами. Скважины за пределами исследуемого участка использовались для более точной интерполяции у границ исследуемой территории.

Исследователи сходятся во мнении, что на территории Москвы образовалось минимум 39 карстово-суффозионных поверхностных прояв-

лений. Авторами настоящей статьи были проанализированные отчеты о региональном изучении карстовых проявлений на территории Москвы, составленные С.И. Парфеновым, Н.Н. Лебковым, Н.Т. Калмыковым и др., содержащие информацию о местоположении проявлений, в соответствии с ней проявления были нанесены на карту. Из архивных отчетов была получена информация о дате образования (дате первого упоминания в архивных источниках), длине, ширине и глубине каждого проявления. На основании этих данных было выяснено, что три понижения неустановленного генезиса (см. рис. 1) имеют диаметры 250, 150 и 80–30 м (понижение овальной формы), при этом самые большие диаметры проявлений карстово-суффозионного генезиса составляют 53, 40 и 38 м. Два из трех понижений неустановленного происхождения закартированы Е.Г. Качугиным в 1932 г., информация о третьем получена благодаря архивному топографическому плану масштаба 1 : 2 000, построенному по данным 1947 г. Другой задокументированной информации об этих формах рельефа нет. Учитывая их большой размер в плане, не свойственный данной инженерно-геологической обстановке, авторы склоняются к тому, что их происхождение вряд ли связано с карстово-суффозионным процессом.

Буровой журнал или колонка каждой скважины изучались, необходимая информация заносилась в базу атрибутивных данных, которая в процессе исследования пополнялась новыми показателями строения и состояния геологической среды.

В начале авторы попытались определить приуроченность поверхностных проявлений к какому-то определенному диапазону характеристик строения закарстованного горизонта и перекрывающей его толщи. В качестве характеристик для анализа были выбраны данные о состоянии первого от поверхности слоя карбонатных отложений, мощности экранирующего глинистого слабопроницаемого слоя, а также количество водоупоров в перекрывающей толще.

Одно из условий развития карстово-суффозионного процесса — наличие полостей, в которые бы мог быть вынесен дисперсный материал. Такими полостями в условиях Москвы могут служить трещины и пустоты в известняках и доломитах каменноугольного возраста. На рис. 1 показаны скважины, в которых при бурении были вскрыты незаполненные полости.

В границах исследуемой зоны зафиксировано 39 полостей: 5 — в отложениях среднего отдела каменноугольной системы с высотой от 0.2 до 1.2 м (в среднем 0.66 м); 34 обнаружены в отложениях среднего отдела каменноугольной системы, их высота изменяется от 0.1 до 1.2 м (в среднем 0.51 м). На рис. 2 приведена гистограмма высот пустот.

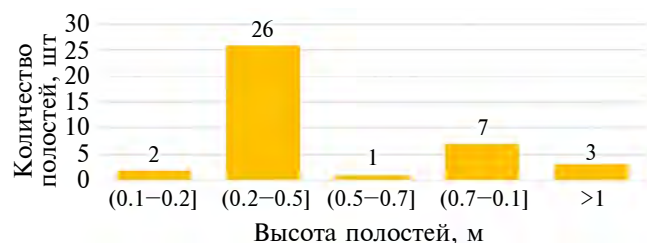


Рис. 2. Гистограмма высот пустот.

Полости вскрыты в 38 скважинах (в одной из скважин вскрыты полости в отложениях обоих отделов каменноугольной системы).

Для установления приуроченности поверхностных проявлений к типу строения толщи грунтов, покрывающих закарстованный горизонт, а именно количеству водоупоров, залегающих над первым от поверхности слоем карбонатных отложений, авторами выполнено районирование территории по типу разреза. Для районирования использовали данные 448 скважин, расположенных в границах исследуемого участка. Идея о проведении подобного районирования пришла авторам исследования после изучения публикации А.В. Аникеева, А.Л. Рагозина и В.Н. Селезнева [4].

В настоящем исследовании районирование было выполнено по двум показателям:

- наличию в толще экранирующего глинистого горизонта, залегающего над первым от поверхности слоем карбонатных (закарстованных) отложений;
- наличию глинистого слоя в перекрывающей песчаной толще.

В результате было выделено 4 района, характеризующихся следующими особенностями строения (рис. 3), когда на карбонатных отложениях залегают:

- несвязные (песчаные) отложения (тип 1);
- несвязные (песчаные) отложения, однако в их толще присутствуют связные (глинистые) отложения (тип 2);
- связные (глинистые) отложения, а все отложения выше по разрезу представлены несвязными породами (тип 3);
- связные (глинистые), однако в толще несвязных (песчаных) вышележащих отложений встречается еще один слой слабопроницаемых пород (тип 4).

Граница участков с 1 и 2 типом разрезов является примерной границей литологических окон в водоупоре, отделяющем каменноугольный водоносный горизонт от надъяюрского водоносного комплекса.

Результатом стала карта районирования территории по типу строения перекрывающей толщи (рис. 4). Территории с первым типом разреза занимают 8.3%, с вторым — 3.6%, с третьим — 34.6%, с четвертым — 53.5% от площади исследуемого участка.

На участках с 1 и 2 типом разреза не зафиксировано ни одного карстово-суффозионного проявления, на участках с 3 типом — 22 проявления (12.88 шт/км²), с 4 типом — 17 проявлений (6.42 шт/км²). Отсутствие проявлений на участках с 1 и 2 типами разрезов можно объяснить кольматацией трещин в карбонатных отложениях песчаным и глинистым материалом [14]. Наивысшая плотность провалов на участках

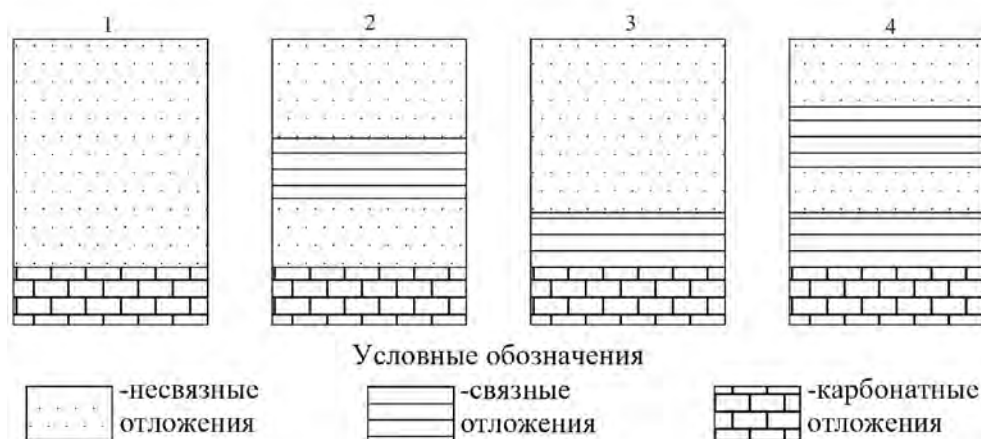
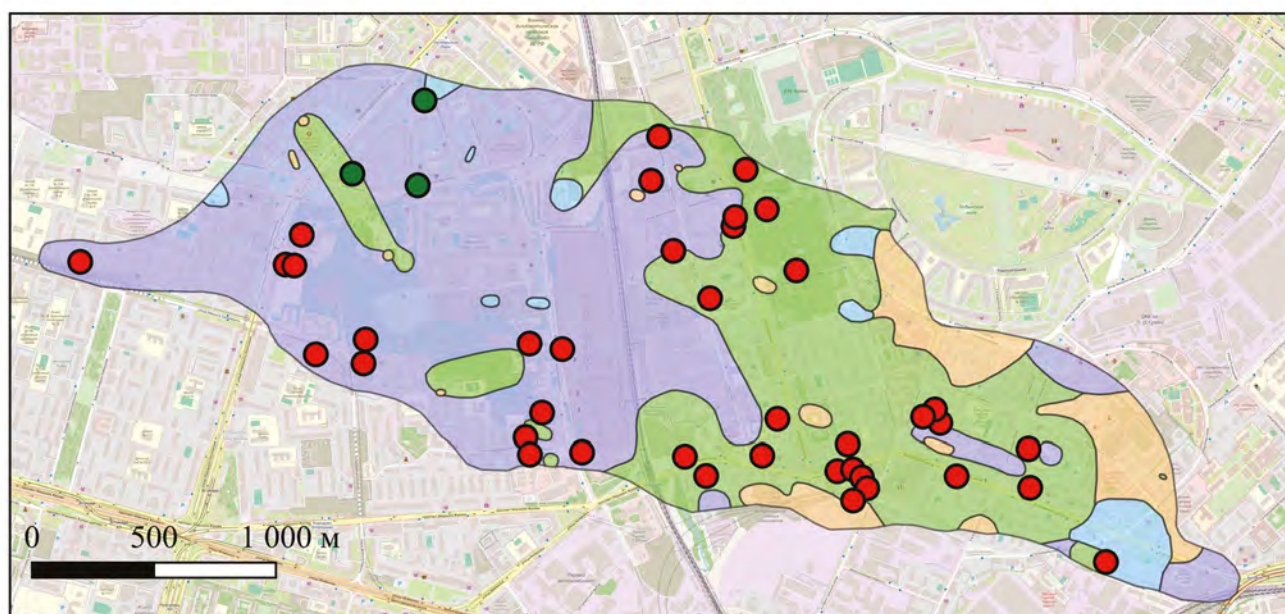


Рис. 3. Типы строения толщи грунтов, залегающей над первым от поверхности слоем карбонатных отложений.



Условные обозначения

Типы разреза:		Понижения земной поверхности:			
	1		3		карстово-суффозионные воронки, провалы и мульды оседания
	2		4		неопределенного генезиса

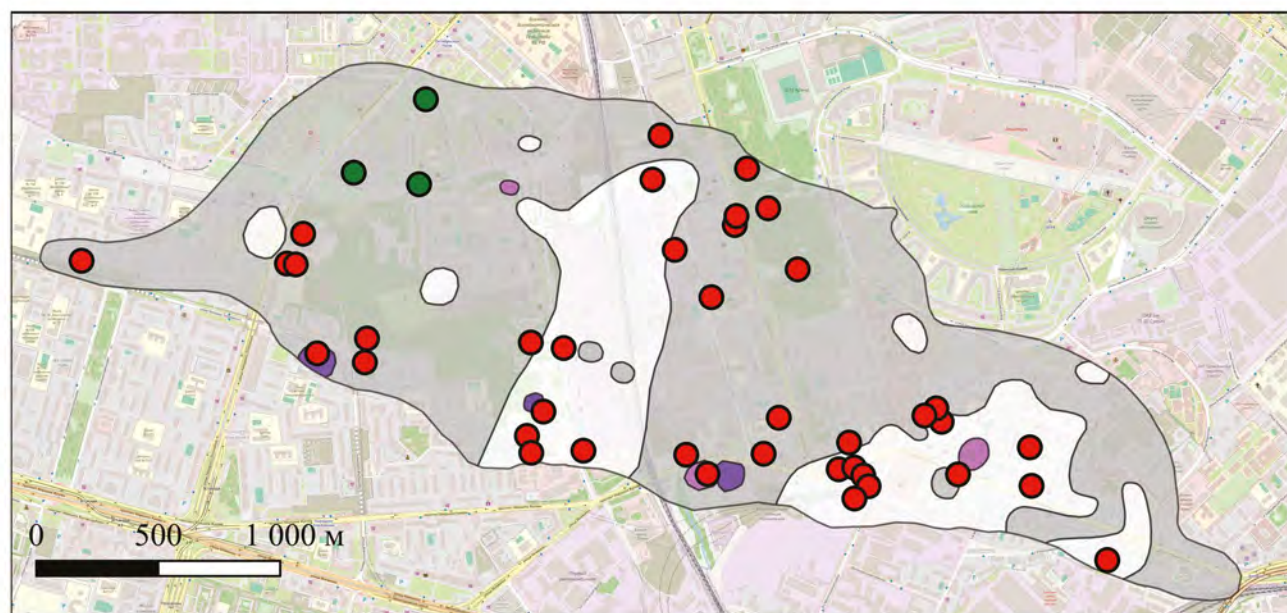
Рис. 4. Карта районирования территории по типу строения перекрывающей толщи.

с 3 типом строения перекрывающей толщи — она почти в 2 раза выше плотности на участках с 4 типом строения. Это свидетельствует, что наличие в перекрывающей толще связанных отложений второго водоупорного слоя может являться фактором, уменьшающим вероятность образования на земной поверхности замкнутого локального понижения карстово-суффозионного происхождения.

Авторами была составлена карта районирования территории по преобладающей степени трещиноватости первого от поверхности слоя карбонатных отложений (рис. 5). Для этого в каждой скважине, вскрывшей подошву первого от поверхности слоя карбонатных отложений (любого возраста), было определено соотношение мощностей прослоев различной степени трещиноватости (монолитных, слаботрещиноватых, среднетрещиноватых, сильнотрещиноватых и разрушенных до муки и щебня) к мощности всего первого от поверхности слоя карбонатных отложений. Трещиноватость прослоев определена по данным буровых журналов и колонок скважин. Полученные точечные данные классифицировались в зависимости от преобладающей степени трещиноватости в анализируемом

слое карбонатных отложений. Для построения карты использованы данные буровых журналов 119 скважин, расположенных в границах исследуемого участка.

Территории с монолитным и слаботрещиноватым первым от поверхности слоем известняка занимают по 0.6%, территории с трещиноватым — 25.2%, с сильнотрещиноватым — 73.6% от площади всей исследуемой территории. На первых двух типах участков располагается по одному карстово-суффозионному поверхностному проявлению. На участке, где в разрезе первого от поверхности слоя карбонатных отложений преобладают трещиноватые грунты, расположены 17 проявлений (13.68 шт/км²), где сильно трещиноватые и разрушенные — 20 проявлений (5.44 шт/км²). Из этого можно заключить, что степень трещиноватости первого от поверхности слоя карбонатных отложений также влияет на вероятность поверхностного проявления: чем слой более трещиноватый, тем вероятность больше, однако она значительно меньше, если первый от поверхности слой закарстованных отложений представлен преимущественно сильно трещиноватыми отложениями.



Условные обозначения

Преобладающая степень трещиноватости первого от поверхности слоя карбонатных отложений:

- | | | |
|--|--|---|
|  монолитный |  слаботрещиноватый |  трещиноватый |
|  сильно трещиноватый/ разрушенный до щебня, глыб и карбонатной муки | | |

Понижения земной поверхности:

-  карстово-суффозионные воронки, провалы и мульды оседания
-  неопределенного генезиса

Рис. 5. Карта районирования территории по преобладающей степени трещиноватости первого от поверхности слоя карбонатных отложений.

Районирование территории по степени карстово-суффозионной опасности

Принимая во внимание инженерно-геологические условия исследуемого участка и минимальные скорости растворения карбонатных отложений, при районировании территории по степени опасности необходимо учитывать опасность именно карстово-суффозионного процесса, т.е. *опасность деформирования и разрушения перекрывающей толщи и образование поверхностных проявлений* (воронки, провалов и мульды оседания).

Перед тем, как переходить к районированию территории по степени карстово-суффозионной опасности, следует обосновать возможность/невозможность использования некоторых критериев, предлагаемых в работе [8], а именно: величины градиента вертикальной фильтрации, данных о физических и физико-механических

свойствах грунтов и приуроченность к доледниковым долинам.

Для определения градиента вертикальной фильтрации необходимы данные об уровнях карстовых и надкарстовых подземных вод и мощности разделяющего их водоупора. Так как гидрогеологические условия антропогенно-освоенных территорий меняются очень быстро, использование архивных данных весьма проблематично. В пределах исследуемой территории на 2024 г. размещены 5 действующих наблюдательных гидрогеологических скважин (ГПБУ «Мосэкомониторинг»), 3 из них расположены кустом и позволяют наблюдать уровни донско-московского (водовмещающие породы — несвязные отложения $f, lgIds^3 - II ms^1$), подольско-мячковского (водовмещающие породы — карбонатные отложения $C_2pd - mc$) и каширского (водовмещающие поро-

ды — карбонатные отложения C_2ks) водоносных горизонтов. Две другие скважины оборудованы для мониторинга донско-московского и алексинско-протвинского (водовмещающие карбонатные отложения C_{1al-pr}) водоносных горизонтов. К сожалению, по данным существующих в настоящий момент наблюдательных скважин районирование территории по величине градиента вертикальной фильтрации не представляется возможным.

Согласно п. 6.1.7. СП 47.13330.2016, срок давности данных о физических и физико-механических свойствах грунтов на застроенных территориях составляет 2 года, что также делает невозможным и их использование при районировании.

Приуроченность к доледниковым долинам на участке исследования следует определять не по положению их тальвега, а по расположению долин в плане, однако такие долины опасны меньшими (или нулевыми) значениями мощности юрских отложений, что учитывается при построении карты мощности связанных отложений, залегающих над первым от поверхности закарстованным горизонтом.

Таким образом, *основным (достоверным) параметром при районировании территории Москвы по степени карстово-суффозионной опасности, как уже говорилось выше, является мощность глинистых отложений, залегающих над первым от поверхности слоем карбонатных отложений*. Это связано, в первую очередь, с их экранирующей функцией: они затрудняют доступ поверхностных вод (часто агрессивных к карбонату кальция) к известнякам каменноугольной системы и препятствуют развитию суффозии [7]. По этим причинам повышенная мощность экранирующих отложений может служить препятствием для образования провала, воронки или мульды оседания. Несомненным преимуществом является доступность получения этой информации при бурении. Поэтому, вслед за ведущими работами, в качестве основного параметра для районирования территории авторы использовали мощность экранирующих глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности слой известняка.

Авторами настоящего исследования была построена карта мощности экранирующих глинистых отложений (рис. 6). При ее построении вслед за авторами Карты [9], учитывалась общая мощность связанных грунтов, залегающих над первым от поверхности слоем карбонатных отложений. Мощность экранирующих глинистых отложений определялась путем суммирования мощности разновозрастных связанных отложений. Суммирование проводилось от кровли карбонатных отложений до подошвы первого встреченного в разрезе слоя несвязных грунтов. При построении карты

использовались данные 448 скважин, расположенных в границах изучаемой территории.

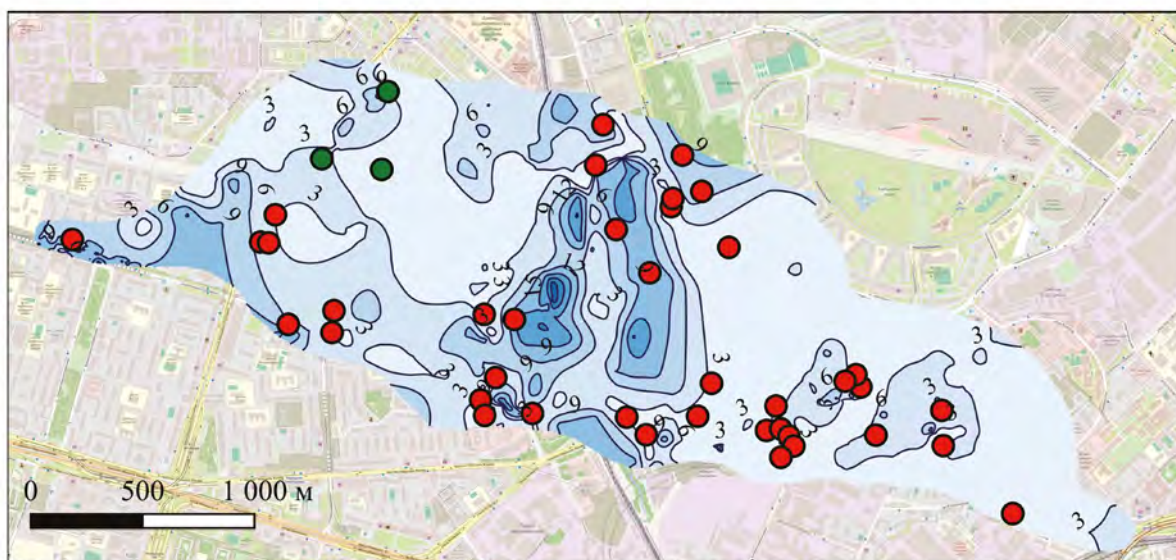
В пределах исследуемого участка [9] общая мощность экранирующих глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности слой карбонатных отложений (известняка), изменяется от 0 до 19 м. Экранирующие глинистые отложения отсутствуют на 0.59 км² территории, что составляет 11.9% его площади.

На основе представленной карты (см. рис. 6) было проведено районирование территории по мощности экранирующих глинистых отложений с использованием двух наборов граничных значений (рис. 7). При смещении границы, отделяющей участки опасной категории от участков потенциально опасной категории, с изопакиты 3 до 5 м площадь участка, который можно определить как опасный, увеличивается на 1.19 км² (24.1%), а площадь неопасного участка при смещении изопакиты районирования, отделяющей неопасную категорию от потенциально опасной, с 10 до 12 м уменьшается на 0.21 км² (4.3%) (табл. 1).

С помощью геоинформационной системы было автоматическим образом извлечено значение мощности глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт (см. рис. 6), в местах известных провалов. Из 42 провалов два образовались на участках с мощностью экранирующих глинистых отложений $10 < h < 12$ м. Поэтому в дальнейшем при районировании границей между потенциально опасной и безопасной категориями была выбрана изопакита экранирующих глинистых отложений 12 м. В качестве значения мощности экранирующих глинистых отложений, являющегося границей между опасной и потенциально опасной категориями, авторы данного исследования использовали мощность 3 м, придерживаясь работы [8].

Таким образом, первым параметром районирования территории по степени карстово-суффозионной опасности авторы настоящей статьи использовали мощность глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт. К опасной территории предлагается относить участки с мощностью экранирующих глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт, менее 3 м, к потенциально опасным — 3–12 м, к неопасным — территории с мощностью экранирующих глинистых отложений более 12 м (рис. 8а).

Учитывая, что за последние 25 лет на данной территории не зарегистрировано ни одного понижения земной поверхности природного генезиса, так как откачки подземных вод стали более умеренными и не привели к понижениям их уровней до отметок второй половины XX в., авторы сделали вывод о весьма низкой вероятности образования новых поверхностных проявлений карстово-



Условные обозначения

Мощность экранирующих глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности слой известняка, м:

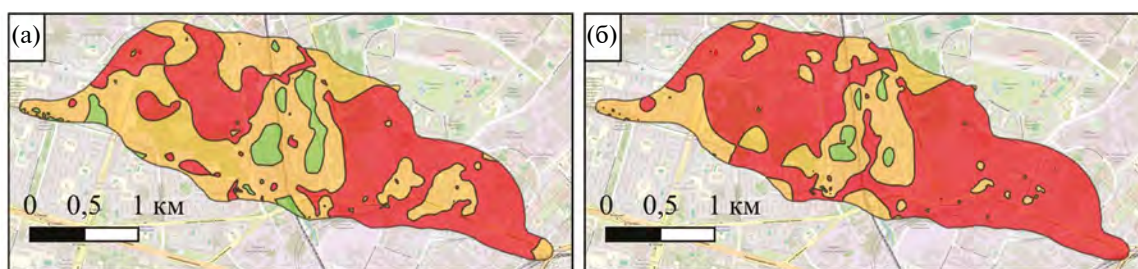


Понижения земной поверхности:

- карстово-суффозионные воронки, провалы и мульды оседания
- неопределенного генезиса

— изопакиты

Рис. 6. Карта мощности экранирующих глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности слой карбонатных отложений (известняка).



Условные обозначения

— изопакиты

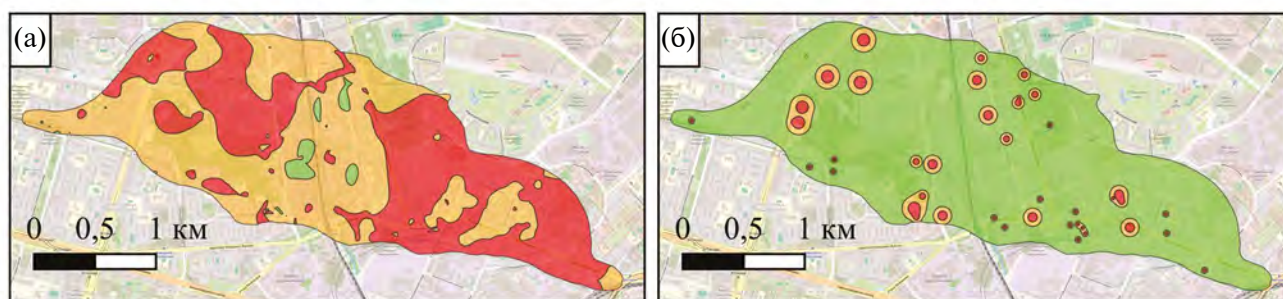
Мощность экранирующих глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности слой известняка, м:



Рис. 7. Карты районирования территории по мощности глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности слой карбонатных отложений (известняка), по изопакитам: а – 3 и 10 м, б – 5 и 12 м.

Таблица 1. Площадь участков при районировании территории по мощности глинистых отложений по изопактам 3 и 10 м и 5 и 12 м

Мощность экранирующих глинистых отложений, м	Площадь, км ²	Мощность экранирующих глинистых отложений, м	Площадь, км ²
<3	2.28	<5	3.47
от 3 до 10	2.35	от 5 до 12	1.37
>10	0.30	12 и более	0.09

**Условные обозначения**

Мощность экранирующих глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности закарстованный горизонт, м:



Удаленность от ближайшей карстово-суффозионной воронки, провала или мульды оседания:

**Рис. 8.** Карта районирования территории: а – по изопактам глинистых отложений 3 и 12 м, б — по удаленности от ближайшего поверхностного проявления карстово-суффозионного процесса.

суффозионного процесса в условиях сохранения уровней подземных вод на современных отметках.

Однако возможность повторной активизации проявлений во второй половине XX в. и образования на небольшом удалении от них новых проявлений при незначительном изменении гидрогеологического режима исключать не стоит. Полное пространство растворимых пород в процессе провалообразования заполняется частицами вышележащих грунтов, но предположить полную кольматацию всех трещин карбонатных отложений можно только в случае прекращения провалообразования по естественным причинам.

В Москве же провалообразование активизировалось по причине сильного антропогенного понижения уровня подземных вод и остановилось после прекращения бесконтрольных откачек. Поэтому быть уверенными, что пустоты в карбонатных отложениях в зоне выноса материала заполнились

полностью в прошлом веке и остались заполненными до сегодняшнего дня, нельзя. Нельзя однозначно утверждать, что увеличение градиента вертикальной фильтрации не приведет к продолжению выноса несвязных грунтов в трещины и полости карбонатных отложений на участках уже известных проявлений. Так как осуществляющие строительство компании не передают информацию об объемах откачек ни в одну государственную организацию, осуществляющую гидрогеологический мониторинг на территории города, отслеживать изменение величины градиента вертикальной фильтрации не представляется возможным. Исходя из этого, использование градиента вертикальной фильтрации для своевременного определения опасных и потенциально опасных участков авторы считают неприемлемым.

Комплексом инженерно-геологических методов изучено всего 14 проявлений. И все прове-

денные на сегодняшний день многочисленные исследования по определению причин активизации провалообразования не смогли ответить на основные вопросы: “Почему провалы образовались именно на этих местах? Почему при идентичных условиях на двух участках, провал образовался только на одном из них?”. Поэтому утверждать, что карстово-суффозионный процесс на территории города полностью изучен и понятен, тоже нельзя.

Из всего вышесказанного напрашивается вывод: есть какой-то фактор провалообразования, который на существующем этапе исследования установить не удалось. Так как геологическая среда неоднородна и в плане, и в разрезе, и, допуская, что места образования всех известных проявлений являются областями с наличием какого-то определенного, достоверно неустановленного набора характеристик этой среды, авторы выдвигают предположение, что при изменении существующей гидрогеологической обстановки участки известных проявлений и наиболее приближенные к ним территории с наибольшей вероятностью могут подвергнуться процессу провалообразования.

Этот довод, в совокупности с невозможностью оценки величины градиента вертикальной фильтрации и использования физических и механических свойств четвертичных и юрских отложений при районировании территории по степени карстово-суффозионной опасности, наводит на мысль о **допустимости использования метода районирования по удаленности от ближайшего известного поверхностного проявления.**

Основоположник метода районирования территории по удаленности от поверхностных проявлений карста — И.А. Саваренский [18]. Суть метода заключается в построении карт изолиний равной удаленности от известных поверхностных проявлений. И.А. Саваренский в работе [17] отмечал, что поверхностные карстовые формы локализуются в пределах некоторых областей (карстовых полей) и число их проявлений на единицу площади уменьшается по мере увеличения удаленности от известных форм, следовательно, уменьшается и степень опасности. Опираясь на его труды, ряд авторов выполнили прогнозирование устойчивости закарстованных территорий по удаленности от карстовых проявлений [19]. Метод зонирования территории по мере удаленности от карстовых форм был включен во вторую часть СП 11-105-97. Метод удаленности от ближайшего карстового проявления позволяет установить степень подверженности района образованию поверхностных проявлений, и он активно используется вместе с другими методами и методиками оценки опасности [5, 6]

В зависимости от масштаба карты и поставленных задач отсчет расстояния можно вести как

от центра проявления, так и от его края. Если воронка в масштабе карты отображена площадным знаком (размер воронки отображается в масштабе карты), то И.А. Саваренский предлагает строить изолинии удаленности от краев проявлений. Масштаб картирования в данном исследовании составляет 1 : 5 000, диаметры проявлений карстово-суффозионного генезиса изменяются от 1.5 до 53 м (на карте 0.3—10.6 мм), их средний диаметр составляет 12 м (на карте 3.0 мм), поэтому районирование территории по удаленности проведено авторами от центра проявлений. Круглую форму в плане имеют 27 из 39 проявлений карстово-суффозионного происхождения. Диаметр изометричных понижений изменяется от 1.5 до 53 м (в среднем 10.47 м). Отношения длины к ширине у овальных проявлений изменяется от 1.25 до 3.0, самое больше овальное понижение имеет размеры 40 × 25 м, самое маленькое — 4.5 × 3.0 м, для определения граничных значений районирования по удаленности для овальных понижений был взят средний диаметр (среднее арифметическое между длиной и шириной проявления).

Для определения внешней границы опасной категории, отделяющей ее от потенциально опасной, авторы приняли расстояние от центра провала равное $2.5R$ (где R — радиус провала); для отделения территории потенциально опасной от неопасной — $5R$. При наложении кругов одной и той же категории опасности вокруг разных проявлений они объединялись в единый контур. В противном случае территория районирована отдельными окружностями.

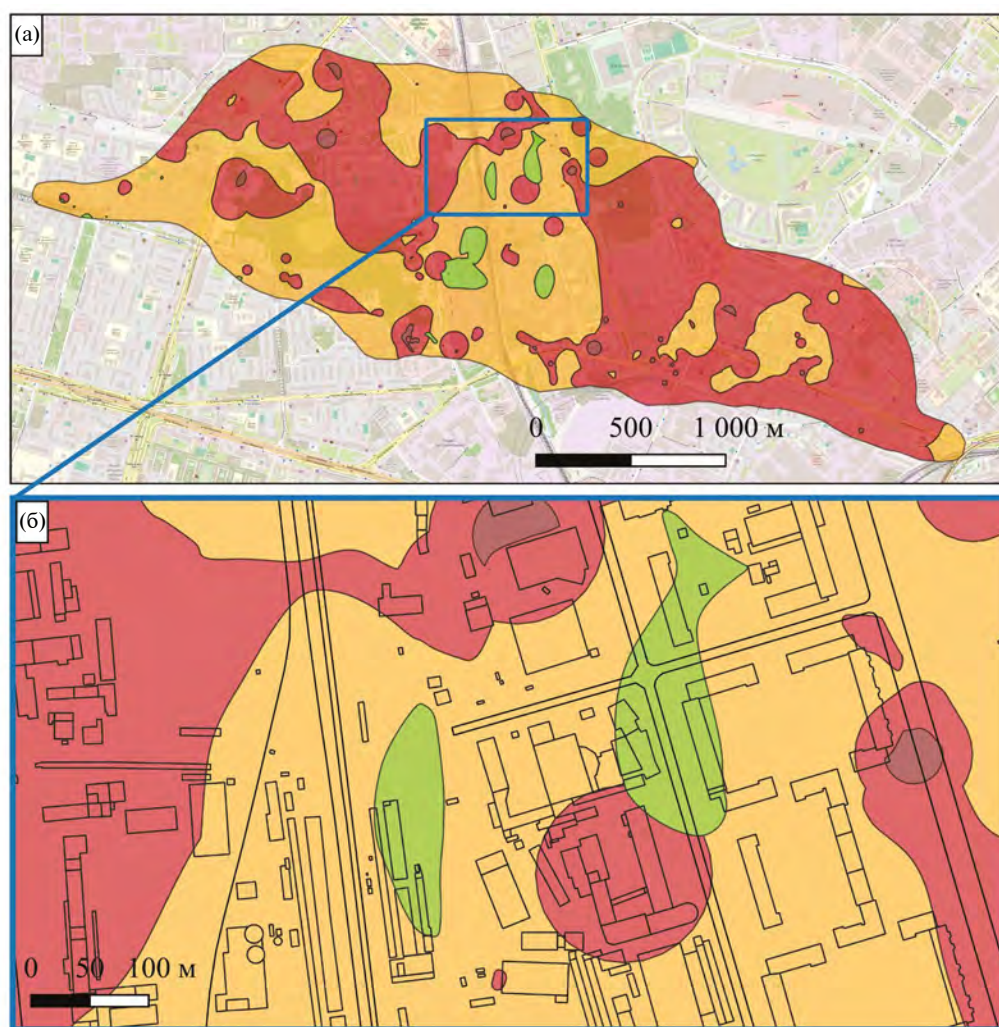
Для технического упрощения проведения районирования проявления в зависимости от диаметра были поделены на 4 группы. Для каждой группы определены расстояния от центров провалов до границ категорий районирования территории по удаленности от ближайшего проявления (табл. 2). Несмотря на то, что генезис 3 понижений не определен, авторы все равно учитывали их при последующем районировании.

Результатом стала карта районирования территории по удаленности от известных поверхностных карстово-суффозионных проявлений (рис. 86).

На основе карт районирования по мощности экранирующих глинистых отложений и удаленности от ближайшего карстово-суффозионного проявления путем наложения одной карты на другую была построена **результатирующая карта районирования территории по степени карстово-суффозионной опасности** (рис. 9). Каждый участок такой синтетической карты имеет две характеристики: мощность глинистых перекрывающих отложений и удаленность от ближайшего поверхностного карстово-суффозионного проявления. В зависимости от их сочетания участку присваивалась категория опасности в соответствии с табл. 3.

Таблица 2. Границы районирования территории по удаленности от известных поверхностных карстово-суффозионных проявлений

Диаметр провалов, м	Расстояние от центра проявления, определяющее границу:	
	опасного участка, м	потенциально опасного участка, м
<10	12.5	от 12.5 до 25
10–20	25	от 25 до 50
20–30	37.5	от 37.5 до 75
>30	50	от 50 до 100

**Условные обозначения**

граница территории, показанной на рис. 9б

Категория по степени карстово-суффозионной опасности:

- | | |
|--|--|
| весьма опасная | потенциально опасная |
| опасная | неопасная |

Рис. 9. Карта районирования участка, ранее полностью отнесенного к опасной категории по степени карстово-суффозионной опасности [9]: а – обзорная, б – фрагмент карты в масштабе 1 : 5 000.

Таблица 3. Районирование территории по степени карстово-суффозионной опасности

Мощность перекрывающих глинистых отложений, м	Расстояние от ближайшего проявления		
	$<2.5R$	$2.5R-5.0R$	$>5R$
<3	весьма опасная	опасная	опасная
от 3 до 12	опасная	опасная	потенциально опасная
>12	опасная	неопасная	неопасная

Выделено 4 категории опасности, и кроме трех общеиспользуемых введена категория “*весьма опасная*” для участков, наиболее приближенных к местам известных провалов с мощностью экранирующих глинистых отложений <3 м. При этом участками неопасной категории предлагается считать удаленные от провалов на расстояние более $2.5R$ и с мощностью глинистых отложений >12 м.

Авторами построена карта районирования в масштабе 1 : 5 000 по степени карстово-суффозионной опасности участка площадью 4.9 км² на территории Москвы, ранее полностью отнесенного к опасной категории по проявлению современных карстово-суффозионных процессов [9] (см. рис. 9б).

На основе новых данных о геологическом строении территории построена более детальная карта мощности глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт, на этом участке. Это позволило точнее провести границу между участками различной категории опасности. В результате введения второго критерия — удаленности от известного карстово-суффозионного поверхностного проявления, авторам удалось учесть при районировании участка и этот параметр, ранее не использовавшийся на территории г. Москва.

ВЫВОДЫ

В пределах области, полностью определяемой в настоящее время как опасная [9], согласно предложенному подходу к районированию, а именно использование двух параметров: мощности глинистых перекрывающих отложений и удаленности от ближайшего поверхностного карстово-суффозионного проявления, были выделены неопасные участки площадью 0.09 км² (1.83%), потенциально опасные — 2.31 км² (46.86%), опасные — 2.50 км² (50.70%) и весьма опасные — 0.03 км² (0.61%). Это позволит снизить объемы проводимых в данном районе инженерно-геологических изысканий за счет понижения категории сложности инженерно-геологических условий территории.

Для более качественного анализа реальной карстово-суффозионной опасности необходимо организовать постоянно действующую сеть

гидрогеологических скважин для регулярных наблюдений за режимом подземных вод (карстовых и надкарстовых водоносных горизонтов). Это позволит установить величину градиента вертикальной фильтрации и использовать данный критерий при районировании. Количество пунктов наблюдения должно обеспечивать возможность построения карт в масштабе хотя бы 1 : 10 000 (согласно таблице 6.1 СП.446.1325800.2019 для III категории сложности инженерно-геологических условий плотность данных для масштаба съемки 1 : 10 000 должна составлять 16 выработок на 1 км²). Таким образом, на исследуемом участке площадью 4.9 км² должно находиться минимум 79 точек наблюдения за уровнями подземных вод. Кроме того, необходимо расширить сеть геодезического мониторинга за осадками зданий и сооружений.

Корреляция данных позволит сделать верифицированную оценку карстово-суффозионной опасности исследуемой территории.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР ИГЭ РАН по теме № FMWM-2022-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникеев А.В. О роли карстового процесса в образовании карстово-суффозионных воронок // Сергеевские чтения. Развитие научных идей Е.М. Сергеева на современном этапе: юб. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. акад. Е.М. Сергеева. Вып. 16. М.: РУДН, 2014. С. 224–229.
2. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска: монография. М.: РУДН, 2017. 328 с.
3. Аникеев А.В., Козлякова И.В., Кожневникова И.А. О поверхностных проявлениях карста в Москве // Инженерная геология. 2018. № 4–5. С. 74–88.
4. Аникеев А.В., Рагозин А.Л., Селезнев В.Н. Оценка геологического риска на участке городского строительства // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2007. № 6. С. 547–560.
5. Дублянская Г.Н., Ковалева Т.Г., Лихая О.М. и др. Оценка карстоопасности и устойчивости закарстованных урбанизированных территорий (на примере г. Кунгур) // Сергеевские чтения. Вып. 10. М.: ГЕОС, 2008. С. 129–133.

6. Жильцова В.Ю., Ковалева Т.Г. Значение метода удаленности от ближайшего карстопоявления при карстологической оценке // Карст и пещеры. 2024: сб. матер. Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием / Под ред. Н.Г. Максимовича и др. Пермь: ПГНИУ, 2024. С. 35–40.
7. Иксанова Е.А. Вклад докайнозойского карбонатного карста в развитие современных просадочных процессов в г. Москве [Электронный ресурс]: дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2005. 156 с.
8. Инструкция по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-суффозионных процессов. М.: Картолитография, 1984. 15 с.
9. Карта опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов. Масштаб 1 : 10 000. 2-я ред. [Авторы: Кутепов В.М., Анисимова Н.Г., Грибов Е.М., Кожевникова И.А., Козлякова И.В. и др.]. М.: ГУП “Мосгоргеотрест”, ИГЭ РАН, 2012.
10. Кочев А.Д. Зоны доломитизированных известняков и линеаменты как индикаторы повышенной закарстованности карбонатных пород // Инженерная геология. 2022. № 2. С. 28–41.
11. Кочев А.Д. Изучение механизма образования карстово-суффозионных воронок в г. Москве // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: матер. XVI Общерос. научно-практ. конф. М.: ООО “Геомаркетинг”, 2021. С. 105–120.
12. Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зойниц И.Л. К вопросу инженерно-геологического районирования территории северо-запада г. Москвы по степени опасности развития карстово-суффозионных процессов // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения: матер. докладов научно-практ. конф. М.: ООО “Геомаркетинг”, 2017. С. 24–40.
13. Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зойниц И.Л. Карстово-суффозионные процессы на территории г. Москвы и проблемы оценки их опасности // Инженерная геология. 2018. № 6. С. 24–32.
14. Кочев А.Д., Шумкин Е.А., Скворцов А.Г., Царев А.М., Мамбетов В.С. Опыт комплексного изучения опасного в карстово-суффозионном отношении участка на северо-западе г. Москвы // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях: матер. XVI Общерос. научно-практ. конф. М.: ООО “Геомаркетинг”, 2023. С. 51–71.
15. Кутепов В.М., Кожевникова В.Н. Устойчивость закарстованных территорий. М.: Наука, 1989. 152 с.
16. Москва: геология и город / Гл. ред. В.И. Осипов, О.П. Медведев. М.: АО “Московские учебники и картолитография”, 1997. 400 с.
17. Саваренский И.А. Прогноз устойчивости территории методом удаленности от ближайшего проявления карста // Прогноз изменений инженерно-геологических условий при строительстве: сб. науч. тр. М.: Наука, 1990. С. 108–118.
18. Саваренский А.И., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М: ПНИИС, 1995, 167 с.
19. Щербakov С.В., Золотарев Д.Р. Прогнозирование устойчивости закарстованных территорий (на примере г. Кунгур) // Конференция студентов, аспирантов и молодых ученых геологического факультета Пермского государственного университета: матер. конф. Пермь. 2008. С. 164–168.
20. Camila Schuch, Paulo Galvão, Marília Carvalho de Melo, Simone Pereira. Overexploitation Assessment in an Urban Karst Aquifer: the case of Sete Lagoas (MG), Brazil // Environmental Research. 2023. 236(4):116820.
21. Chunmeng Mo, Shenglin Xin, Fen Huang, et al. Characteristics of Dissolution Changes in Carbonate Rocks and their Influencing Factors in the Maocun Basin, Guilin, China // Water. 2023. 15: 3285.

ZONING THE TERRITORY IN THE NORTHWEST OF MOSCOW ACCORDING TO THE DEGREE OF KARST AND SUFFOSION HAZARD

E. R. Romanova^{a,b,#}, F. K. Bufeey^{a,c,##}

^aSergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia

^bNational Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse 26, Moscow, 129337 Russia

^cS.Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, ul. Miklukho-Maklaya 23, Moscow, 117997Russia

[#]E-mail: romanova.elizaveta.r@yandex.ru

^{##}E-mail: fbufeey@mail.ru

The study of karst hazard associated with the suffusion is a very relevant topic for construction sites in Moscow upon performing engineering geological survey and developing means of protecting the territory. According to archival data, a site with an area of 4.9 km² in the north-west of the city belongs to “hazardous” category. Within this area, 42 karst sinkholes were recorded in the 20th century. In the article, the authors analyze the geological conditions of the site based on the study of more than 400 wells. The work attempts to find a connection between the parameters of the geological environment structure and the appearance of sinkholes. A map of the thickness of clay deposits overlying the karst horizon has been compiled. A new approach to zoning the territory according to the degree of karst hazard has been proposed, as a result of which the area of the territory classified as “hazard” is reduced to 2.50 km².

Keywords: karst, karst cavities, sinkhole, karst hazard, zoning according to the degree of karst hazard

REFERENCES

1. Anikeev, A.V. [On the role of karst process in the formation of karst-suffusion sinkholes] in: [Proc. 16th Sergeev's readings. Development of scientific ideas of E.M. Sergeev at the present stage: anniversary conf. dedicated to the 100th birthday of academician E.M. Sergeev]. Moscow, RUDN Publ., 2014, pp. 224–220. (in Russian)
2. Anikeev, A.V. [Collapses and sinkholes in karst areas: mechanisms of formation, forecast and risk assessment]. Moscow, RUDN Publ., 2014, 328 p. (in Russian)
3. Anikeev, A.V., Kozlyakova, I.V., Kozhevnikova, I.A. [About the surface manifestations of karst in Moscow]. *Inzhenernaya geologiya*, 2018, no. 4–5, pp. 74–88. (in Russian)
4. Anikeev, A.V., Rogozin, A.L., Seleznev, V.N. [Geological risk assessment at an urban construction site]. *Geoekologiya*, 2007, no. 6, pp. 547–560 (in Russian)
5. Dublyanskaya, G.N., Kovaleva, T.G., Likhaya, O.M. et al. [Assessment of karst hazard and sustainability of karst-prone urbanized territories (by the example of Kungur town)]. *Sergeev readings*, issue 10, Moscow, GEOS Publ., 2008, pp. 129–133. (in Russian)
6. Zhil'tsova, V.Yu., Kovaleva, T.G. [The significance of the method of remoteness from the nearest karst phenomenon in karstological assessment]. In: [Karst and caves — 2024. Proc. All-Russian Sci. and Pract. conference with the International participation]. N.G. Maksimovich et al., Eds. Perm, PGNIU, 2024, pp. 35–40. (in Russian)
7. Iksanova, E.A. [Contribution of the pre-Cenozoic carbonate karst to the development of modern subsidence processes in Moscow]. Cand. Sci. (Geograph.) Diss. Moscow, Moscow State University, 2005, 156 p. (in Russian)
8. [Instructions for the design of buildings and engineering structures in the districts of Moscow with the manifestation of karst-suffusion processes]. Moscow, Kartolitografiya Publ., 1984, 15 p. (in Russian)
9. [Hazard map of ancient karst forms and modern karst-suffusion processes]. Authors: Kutepov, V.M., Anisimova, N.G., Gribov, E.M. et al. Moscow, 2012, 68 p. (in Russian)
10. Kochev, A.D. [Zones of dolomitized limestones and lineaments as indicators of increased karstification of carbonate rocks]. *Inzhenernaya geologiya*, 2022, no. 2, pp. 28–41. (in Russian)
11. Kochev, A.D. [Study of the mechanism of karst-suffusion sinkhole formation in Moscow]. In: [Proc. the XVI All-Russian Sci. and Pract. Conf. “Prospects for the development of engineering survey in construction in the Russian Federation”]. Moscow, 2021, pp. 105–120. (in Russian)
12. Kochev, A.D., Chertkov, L.G., Zoyonts, I.L. [On the issue of engineering geological zoning of the territory in the northwest of Moscow according to the degree of karst-suffusion development hazard]. In: [Proc. Sci. Pract. Conf. “Current engineering geological problems and methods for solving them”]. Moscow, Geomarketing Publ., 2017, pp. 24–40. (in Russian)
13. Kochev, A.D., Chertkov, L.G., Zoyonts, I.L. [Karst suffusion processes in the territory of Moscow and the problem of assessing their hazard]. *Inzhenernaya geologiya*, 2018, no.6, pp. 24–32. (in Russian)
14. Kochev, A.D., Shumkin, E.A., Skvortsov, A.G. et al. [Study of hazardous natural processes and geotechnical monitoring during engineering survey]. In: [Proc. the All-Russian Sci. and Pract. Conf. “Study of hazardous natural processes and geotechnical monitoring during engineering survey”], Moscow, Geomarketing Publ., 2023, pp. 51–71. (in Russian)
15. Kutepov, V.M., Kozhevnikova, V.N. [Stability of karst areas]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 152 p. (in Russian)
16. [Moscow: geology and the city]. V.I. Osipov, O.P. Medvedev, Eds., Moscow, Moskovskie uchebniki i kartolitografiya Publ., 1997, 400 p. (in Russian)
17. Savarenskii, I.A. [Forecast of the stability of the territory by the method of remoteness from the nearest karst manifestation]. In: [Forecast of changes in engineering geological conditions during construction]. Moscow, Nauka Publ., 1990, pp. 108–118. (in Russian)
18. Savarenskii, A.I., Mironov, N.A. [Guide to engineering geological survey in areas of karst development]. Moscow, PNIIS, 1995, 167 p. (in Russian)
19. Shcherbakov, S.V., Zolotarev, D.R. [Prediction of stability of karstified areas (by the example of Kungur town)]. In: [Conf. of students, graduate students and young scientists of the Geological Faculty of Perm State University: materials of the conference]. Perm, 2008. 164–168 p. (in Russian)
20. Camila Schuch, Paulo Galvão, Marília Carvalho de Melo, Simone Pereira. Over exploitation assessment in an urban karst aquifer: the case of Sete Lagoas (MG), Brazil. *Environmental Research*, 2023, no. 236(4), paper 116820.
21. Chunmeng Mo, Shenglin Xin, Fen Huang, et al. Characteristics of dissolution changes in carbonate rocks and their influencing factors in the Maocun Basin, Guilin, China. *Water*, 2023, no. 15, paper 3285.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 622.831.1:550.8

ОЦЕНКА ПРОЯВЛЕНИЙ РАДОНА НА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ БЫСТРИНСКОГО РАЙОНА КАМЧАТСКОГО КРАЯ

© 2025 г. В. А. Кудряшов

ФГБУН Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения
Российской академии наук (НИГТЦ ДВО РАН),
Северо-Восточное шоссе 30, Петропавловск-Камчатский, 683002 Россия

E-mail: vladimirkudryasho@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.08.2024 г.

После доработки 17.10.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

Камчатский край обладает значительными гидротермальными ресурсами. Основные термоминеральные ресурсы, освоенные рядом с краевым центром (г. Петропавловск-Камчатский), испытывают значительную экологическую нагрузку. В то же время многие гидротермальные ресурсы, находящиеся на значительном расстоянии от краевого центра в экологически чистых местностях, недостаточно изучены. Один из них — Быстринский район, расположенный в центре Камчатки, где разведаны и используются три гидротермальных месторождения, на которых проводились исследования с целью установления наличия эманаии радона (ранее в литературе не отмечавшегося). С использованием измерительного комплекса для мониторинга радона “КАМЕРА-01” проведена предварительная оценка наличия радона в попутном газе скважин Анавайского, Быстринского и Эссовского геотермальных месторождений. Отборы проб проводились на угольные сорбционные колонки непосредственно на оголовках скважин. Обработка результатов проводилась по программе “Радон 98”. Время отбора проб, количество колонок и расход газа с верхней точки оголовка скважины подбирались с учетом минимизации проскока радона. В попутном газе эксплуатационных скважин геотермальных месторождений обнаружен радон. Измеренная активность радона на угле комплекса “КАМЕРА-01” варьировалась от 0.4 до 233 Бк. Наличие радона в скважинах гидротермальных месторождений требует целенаправленного изучения экологического воздействия и одновременно открывает перспективы создания курортно-санаторных комплексов в Быстринском районе Камчатского края. Результаты проведенной работы говорят о необходимости дальнейшего изучения гидротермопроявлений, комплексного изучения бальнеологических компонентов и их влияния на экологию.

Ключевые слова: радон, скважина, гидротермальный источник, бальнеология, курортно-санаторный комплекс, Эссовское, Анавайское и Быстринское месторождения, Быстринский район, Камчатский край

DOI: 10.31857/S0869780925020024 EDN: EPHZTS

ВВЕДЕНИЕ

По некоторым оценкам 80% (около 160 источников) лечебных термальных и минеральных вод России находятся на Камчатском полуострове. На сегодняшний день основная санаторно-курортная зона Камчатского края развивается в непосредственной близости (до 100 км) от г. Петропавловск-Камчатский и г. Елизово и испытывает большую антропогенную нагрузку, например, в долине р. Паратунка, где находятся десятки баз отдыха, санатории и профилактории, Начинский санаторий на базе одноименного место-

рождения геотермальных вод, а также “Озерки” на Кеткинском месторождении и др. [11].

Вместе с тем многие термоминеральные источники, обладающие уникальными бальнеологическими свойствами, расположены именно в экологически чистых отдаленных районах Камчатского полуострова и пока недостаточно изучены. Один из таких районов, обладающий большим рекреационным потенциалом, — Быстринский муниципальный район [22].

Природно-климатические условия Камчатки относительно благоприятные, особенно в цен-

тральной части Камчатского полуострова, где преобладает континентальный климат. С этой позиции, Быстринский район Камчатского края обладает несомненными преимуществами для развития санаторно-курортных объектов. К ним относятся нетронутая природа, чистый воздух и вода, наличие длительно сохраняющегося снежного покрова (горнолыжные курорты), отсутствие загрязняющих производственных объектов.

На территории Быстринской геотермальной провинции находятся три населенных пункта, где с 1980-х годов разрабатываются гидротермальные месторождения^{1,2}: с. Эссо — административный центр (Эссовское месторождение), с. Аनावгай (Аनावгайское месторождение) и п. Горный ключ (Быстринское месторождение), расположенные в центре полуострова на расстоянии около 530 км (по трассе) от г. Петропавловск-Камчатский. Также имеется ряд гидротермопроявлений в виде источников (труднодоступных и пока неосвоенных): Опалькинские, Крерукские, Оксинские, Апапельские, Агликичские и др. Схема расположения источников Быстринской геотермальной провинции приведена на рис. 1.

Как правило, исследования термопроявлений данного района были направлены на получение данных о тепловых ресурсах [5] с целью их использования для теплоснабжения. В этом отношении разбуренные геотермальные месторождения Аनावгайское, Быстринское и Эссовское, используемые в основном для отопления, изучены достаточно хорошо³, однако этих данных крайне мало, чтобы говорить об экологическом воздействии и бальнеологическом использовании геотермальной воды.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РАЗВЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Климат района, где разведаны геотермальные месторождения, — умеренно-континентальный, характеризуется малоснежной морозной зимой и относительно теплым летом, что связано с удаленностью от Охотского моря и Тихого океана и наличием горных хребтов, защищающих район от ветров. В данном районе сосредоточены многочисленные выходы гидротермальных источников со схожими характеристиками, что позволило ранее отнести эту группу источников к Эссовско-Быстринской гидротермальной системе (ГТС). Общая характеристика Эссовско-Быстринской ГТС была приведена в отчете Ю.Ф. Манухина⁴. Эссовско-Быстринская ГТС — гидрогеологическая структура орогенного происхождения, связана с линейным телескопическим грабеном. До глубины 405 м грабен сложен преимущественно неогеновыми вулканогенными породами. ГТС связана с наложенной тектоногенной системой, имеющей несколько очагов разгрузки. Область циркуляции гидротерм до глубины 250–300 м находится выше уровня моря. Очаги разгрузки — продуктивные участки, тяготеют к II надпойменной террасе левобережья р. Быстрая. Эссовско-Быстринская гидротермальная провинция характеризуется трещинно-жильным типом коллекторов в пределах межгорного артезианского бассейна долины р. Быстрая и ее притоков (см. рис. 1).

По составу растворенных газов термальные воды вышеперечисленных месторождений относятся к азотным гидротермам, так как газ в основном состоит из азота (по данным отчетов о результатах геологоразведочных работ на месторождениях, см. сноски 1–4), воды относятся к нейтральным и слабощелочным (рН Аनावгайского месторождения — 6.9–8.6, Эссовского — до 9.1 и Быстринского — 7.5–8.6). По химическому составу воды этих месторождений сульфатные кальциево-натриевые, близки между собой по составу и минерализации (например, для Быстринского месторождения, имеющего самую большую минерализацию, формула химического состава $M2.3 \frac{SO_4 52 Cl 46}{Na 64 Ca 35}$).

Минерализация вод: Аनावгайское — 1.48–1.92 г/дм³; Быстринское — 2.2–2.6 г/дм³, жесткость — 12.0–14.9 мг-экв/дм³; Эссовское месторождение — 0.9–1.0 г/дм³, жесткость — 9.5–13.2 мг-экв/дм³. Для минералогического состава термальных вод характерно высокое содержание кремниевой кислоты (например, Эссовское месторождение — 46.5–72 мг/дм³) и микрокомпонентов,

¹ Ерохин М.Н., Манухин Ю.Ф., Мальцева К.И., Воронкова Л.М. Сводный отчет о результатах разведочных работ на Эссовском геотермальном месторождении, проведенных в 1969–1982 гг. (с подсчетом эксплуатационных запасов по состоянию на 03.1982 г.) (в трех томах). Камчатское промысловое управление по использованию глубинного тепла земли, г. Петропавловск-Камчатский, 1982. Т. 1. 316 с. <https://rfgf.ru/catalog/docview.php?did=9362533b595f26b67f6b0b41f8e4fla4>

² Мальцев В.В., Забарный Г.Н., Махалкин Ю.Л. и др. Сводный отчет о результатах разведочных работ на Аनावгайском геотермальном месторождении, проведенных в 1969–1984 гг. (с подсчетом эксплуатационных запасов по состоянию на июнь 1984 г.) (в двух томах), Камчатское управление по использованию глубинного тепла земли, г. Петропавловск-Камчатский, 1987. Т. 1. 258 с. <https://rfgf.ru/catalog/docview.php?did=23d24fb6d280d6dc4b9db695eca027b9&ysclid=m1ugtfc68m812216964>

³ Асаулова Н.П., Ворожейкина Л.А. и др. Отчет о результатах геологоразведочных работ и опытно-промышленной разработке Быстринского геотермального месторождения за период 1970–2008 гг. п. Термальный, ГУП “Камчатскбургеотермия”. 2008. 202 с. <https://rfgf.ru/catalog/docview.php?did=3e1d988b5f60994d7aeaa9b495659ec3&ysclid=m1t67d68o1496894970>

⁴ Манухин Ю.Ф., Ворожейкина Л.А. Типы промышленных месторождений термоминеральных вод и природного пара вулканических районов Камчатки и геолого-экономические предпосылки их освоения, 1974–77 гг., п. Термальный. Камчатское ГУ, 1977. 373 с., инв. №364638.

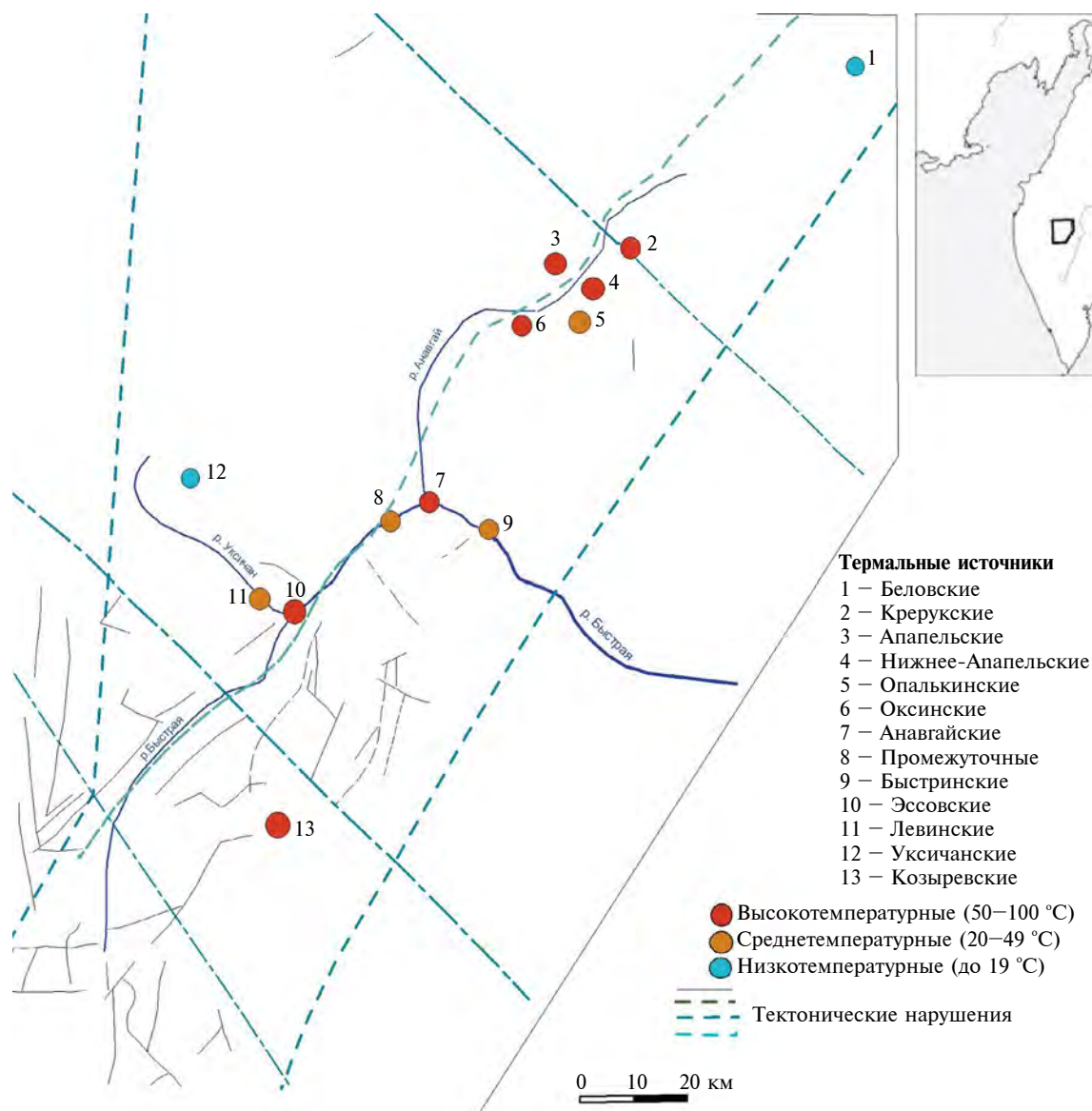


Рис. 1. Схема расположения геотермальных источников Быстринской геотермальной провинции Камчатского края.

[мг/дм³]: фтор (1.2–3.2), литий (0.1–1.7), метаборная кислота (0.8–6.0) и мышьяк (0.05–0.23). Следует отметить, что содержание токсических компонентов мышьяка и метаборной кислоты в термальной воде вышеперечисленных месторождений местами превышает ПДК (0.05 и 0.5 мг/дм³ соответственно), вместе с тем они успешно применяются при лечении различных заболеваний [19, 20].

По температуре воды месторождений относятся к высоко- (Анавайское — 82°С и Эссовское — 78°С) и среднетемпературным (Быстринское — 48°С).

В составе спонтанного газа месторождений в основном содержится азот, [% об.]: Анавайское — 95–98, Быстринское — 96.4–99.6 и Эссовское — 95–98.9. Остальные компоненты

представлены в незначительной концентрации, например, в газах Анавайского месторождения содержатся кислород до 1.53%, метан — 0.04–0.16% и инертные газы: аргон (0.26–1.24%) и гелий (0.0186–0.0350%); сероводорода очень мало (0.03%). В составе газа Эссовского месторождения сероводород не обнаружен, а кислород содержится в значительно меньших количествах — 0.0228–0.0684% об., метан — 0.113–0.144 % об., а инертные газы на уровне Анавайского месторождения: аргон (1.275–1.527 % об.) и гелий (0.0186–0.0350 % об.). Углекислота и водород в составе свободного газа лишь отмечают, их содержание не превышает точности определений.

В Отчете Асауловой Н.П., Ворожейкина Л.А. и др. (см. сноску 3) приведены сведения о микрокомпонентах Анавайского месторождения,

[мг/дм³]: наибольшую концентрацию имел стронций — 1.15–1.83, затем барий 0.16–0.18 и титан 0.08–0.17, в незначительных количествах — молибден, марганец, ванадий, хром, медь, скандий, бериллий, свинец, иттрий, цирконий и серебро, менее 0.01. В рассматриваемых отчетах (см. сноски 1–3) не встречается упоминание о наличии радона в пробах газа и воды на месторождениях.

В настоящее время с учетом потребности в санаторно-курортном лечении (в том числе реабилитации военнослужащих), переориентации развития на внутренний туризм создание на территории Быстринского муниципального района Камчатского края санаторно-лечебно-туристского центра особенно актуально. Создание опорных центров санаторно-курортного лечения на базе геотермальных месторождений было предложено еще в Отчете⁴. Одним из преимуществ комплексного использования бальнеологических вод является наличие в рассматриваемом районе необходимых возобновляемых энергетических ресурсов для строительства и эксплуатации перспективных объектов бальнеологии: теплоэнергетических — геотермальные воды, гидроэнергетических — перспективные малые ГЭС на реках Быстрая и Кававля, а также наличие ветровых и солнечных энергоресурсов.

Близким аналогом гидротермальных вод Быстринской геотермальной провинции по ГОСТ считаются питьевые лечебно-столовые воды Угличского типа [7, 21], отличие состоит в повышенных концентрациях мышьяка и бора в некоторых скважинах, поэтому применение вод Быстринской гидротермальной провинции должно быть ограничено лечебным назначением. Согласно заключению Отчета⁵, воды могут использоваться для лечения сердечно-сосудистой, костно-мышечной, нервной систем и кожи.

Цель исследования

Учитывая минерализацию и газовый состав, характерный для вод глубинного происхождения, автор настоящей работы предположил, что в водах и газах геотермальных месторождений Быстринского района может содержаться радон, который имеет глубинное происхождение и поднимается по разломам в земной коре. К одной из важных задач гидрогеологических исследований с позиции экологии и бальнеологии относится по-

иск источников, имеющих концентрацию радона, превышающую 185 Бк/л⁶.

Таким образом, цель предпринятых исследований — обнаружение радона в эксплуатационных скважинах вышеперечисленных месторождений Быстринского района с оценкой его концентрации, воздействия на экологию района и возможности использования в бальнеологии.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Литературных источников, посвященных изучению радона в источниках на Камчатке, в целом немного. В одной из первых публикаций А.М. Чиркова [18] описано наличие радона в некоторых выходах высокотермальных вод на Камчатке, в которых радон в спонтанных газах содержится в сотнях эман (Е). Приведены данные исследований следующих источников: Узонские (30–94°C) — 1000 Е (3710 Бк/л); Паужетские (47–100°C) — 650 Е (2412 Бк/л); Большие Банные (40–98°C) — 650 Е (2412 Бк/л); Киреунские (63–98°C) — 485 Е (1799 Бк/л); Кошелевские (35–90°C) — 180 Е (668 Бк/л); Начикинские (75–80°C) — 80 Е (297 Бк/л); Налачевские (68–70°C) — 8 Е (30 Бк/л). Для сравнения, например, в подземных водах Байкальского региона концентрация радона варьирует от 0 до 4862 Бк/л [17]. В работе [2] приведены результаты исследований радиоактивных элементов в твердых вулканитах и газах из вулканов и гидротерм Курил и Камчатки, в том числе радона: в фумарольных газах из кратера вулкана Мутновский объемная активность радона составляла 27500 Бк/м³, на Апапельских источниках приведены данные по содержанию радия (источника радона) в количестве до 0.024% равновесного ²³⁸U, который в форме радиобарита концентрировался на участке оруденения Au–Ag. Изменение содержания радона в газах и водах (выделяющихся из фумарол, скважин или почвенных газов) применяется для прогноза извержений, землетрясений и в других научных и прикладных областях.

Радоновые источники согласно бальнеологической классификации минеральных вод, предложенной В.В. Ивановым и Г.А. Невраевым [4], отнесены к группе VI, а согласно другой классификации [9] — к группе Е (*воды радоновые*). В Отчете Петрова М.А. и др. (см. сноску 5) геотермальные источники Быстринского района: Эссовские, Уксичанские, Аनावгайские, Быстринские, отнесены к группе VIIa — кремнисто-азотные источники. Какого-либо упоминания о наличии в них радона не имелось.

⁵ Петров М.А., Кобылинский В.И., Котельникова Т.К. Отчет о результатах специализированных гидрогеологических работ по оценке перспектив Камчатской области на минеральные воды (1987–1991 гг.). ППГЭ. пос. Термальный, 1991. Инв. 5503. <https://www.rfgf.ru/catalog/docview.php?did=79d6767f0bc7138fa021104c4744b25c>

⁶ Беккерель (Бк, Bq — единица активности нуклида в радиоактивном источнике (в системе СИ один беккерель соответствует одному распаду в секунду для любого радионуклида).

По классификации к радоновым водам отнесены те, в которых содержание радона не менее 50 Е (185.5 Бк/л), для примера, минимальная лечебная норма составляет, [Бк/л]: в Германии — 6885, в Чехии — 1192, в Польше — 375, во Франции — 370, а в Венгрии — 3 [15]. Таким образом, для бальнеологии граница радоновых вод довольно условна, так как необходимая интенсивность воздействия может регулироваться временем контакта с радоном. Например, согласно исследованиям [14], наиболее эффективным для лечения больных коксартрозом и гонартрозом является курс из 12 посещений радонового эманатория длительностью по 60 мин с концентрацией (активностью) радона в воздухе 150 Бк/л и температурой воздуха 35–37°C.

Для курортов бывшего СССР содержание радона в природных водах колеблется от 30–40 Е (111.3–148.4 Бк/л) — Цхалтубо; до 3000 Е (11130 Бк/л) — Джети-Отуз; 5000 Е (6290 Бк/л) — Пятигорск. В Западной Сибири курорт Белокуриха в Алтайском крае (в среднем активность радоновой воды в радонолечебнице санатория “Алтай-Вест” составляет 177 ± 13 Бк/л [1]), в Алтайском крае есть Заельцовские источники (R_n 240 Бк/дм³), в Восточной Сибири в Красноярском крае — Тумнин, в Бурятии — Нилова Пустынь, в Еврейской автономной области — Кульдур и др.

На потенциальную возможность радонопроявлений на геотермальных месторождениях в Быстринском районе указывала карта России, на которой показаны зоны повышенной опасности радона [10]. Согласно этой карте поселки Эссо, Анавай, Горный ключ (Быстринское месторождение) [22] находятся на границе радоноопасной территории (т.е. радон может как быть, так и отсутствовать). Несмотря на то, что с позиции гидрологии месторождения достаточно хорошо исследованы, какого-либо упоминания о радоне на месторождениях в гидрогеологических отчетах⁷ не имеется.

Существует множество методов определения радона (эманационный, трековый, радиографии, фильтров и т.п. [12]), подробно описанные в [23]. В настоящей работе использовался простой метод измерения радона, вместе с тем имеющий достаточную точность измерения для целей данного исследования [6], основанный на поглощении (адсорбции) радона углем в пробе, размещенной непосредственно на объекте исследований. Измерения на угле проводились с помощью комплекса по бета- и гамма-излучению дочерних продуктов распада радона — ²¹⁴Bi и ²¹⁴Pb. Методика измерения плотности потока радона (ППР) и объемной

активности радона (ОАР) комплекса “Камера-01” подробно описана в [6].

Схемы поселков Быстринского района и расположение эксплуатационных скважин, где были проведены отборы проб на радон, представлены на рис. 2.

Поскольку в верхней части оголовка скважин находится свободное пространство, заполняющееся попутным газом, была предпринята попытка отбора газа в батарею до пяти последовательно соединенных сорбционных колонок (СК-13). Для этого на оголовках эксплуатационных скважин были проведены врезки шаровых кранов ½” для отбора газа. Отбор газа на сорбционные колонки осуществлялся непосредственно с верхней части оголовка скважины (схема отбора приведена на рис. 3).

Общий объем воздуха (газа), прокачиваемого через последовательно соединенные сорбционные колонки, согласно методике НТЦ “НИТОН”, ограничен абсорбционной емкостью активированного угля, которая зависит от марки угля, влажности воздуха и скорости прокачки воздуха через СК-13.

Согласно исследованиям, проведенным в [8], выявлено, что при расходе воздуха менее 0.5–0.6 л/мин практически весь радон поглощается объемом активированного угля абсорбера. Эксперименты по отбору газа с оголовка скважин проводились так, чтобы объемный расход не превышал этих значений (за редким исключением, когда использовались батареи последовательно включенных СК-13).

Вместе с тем, согласно методике НТЦ “НИТОН”, коэффициент проскока $K_{пр}$ радона через СК-13 при условиях и параметрах пробоотбора не превышает 10%. Расход отбираемого газа измерялся с помощью объемного метода через наполнение газом перевернутой емкости, заполненной водой, время фиксировалось секундомером. “Проскок” радона после первой СК-13 улавливался в последующих камерах. По результатам измерений в зависимости от расхода и концентрации практически весь радон задерживался в первых двух (максимум четырех) камерах, таким образом, оставшиеся камеры выполняли роль контрольных. Пересчет суммарной объемной активности радона в пробе газа проводился по формуле:

$$C = 538 \cdot (Ck1 + Ck2 + Ck3 + Ck4 + Ck5) \times \exp(0.00755 \cdot T) / (t_{отб}/60), \quad (1)$$

где $Ck1...5$ — объемная активность радона в угле в последовательных сорбционных камерах; T — время, прошедшее с момента отбора газа на оголовке скважины до обработки результатов, час;

⁷ Барбашинов Г.А., Борисов Н.В. и др. Отчет по результатам гидрогеологической съемки масштаба 1 : 200 000 территории листа О-57-XXXIV, проведенной в 1982–1984 гг. ПГГЭ. пос. Термальный, 1984. <https://rfgf.ru/catalog/docview.php?did=02ce0c8381ec4e225203e41bd734ea43>

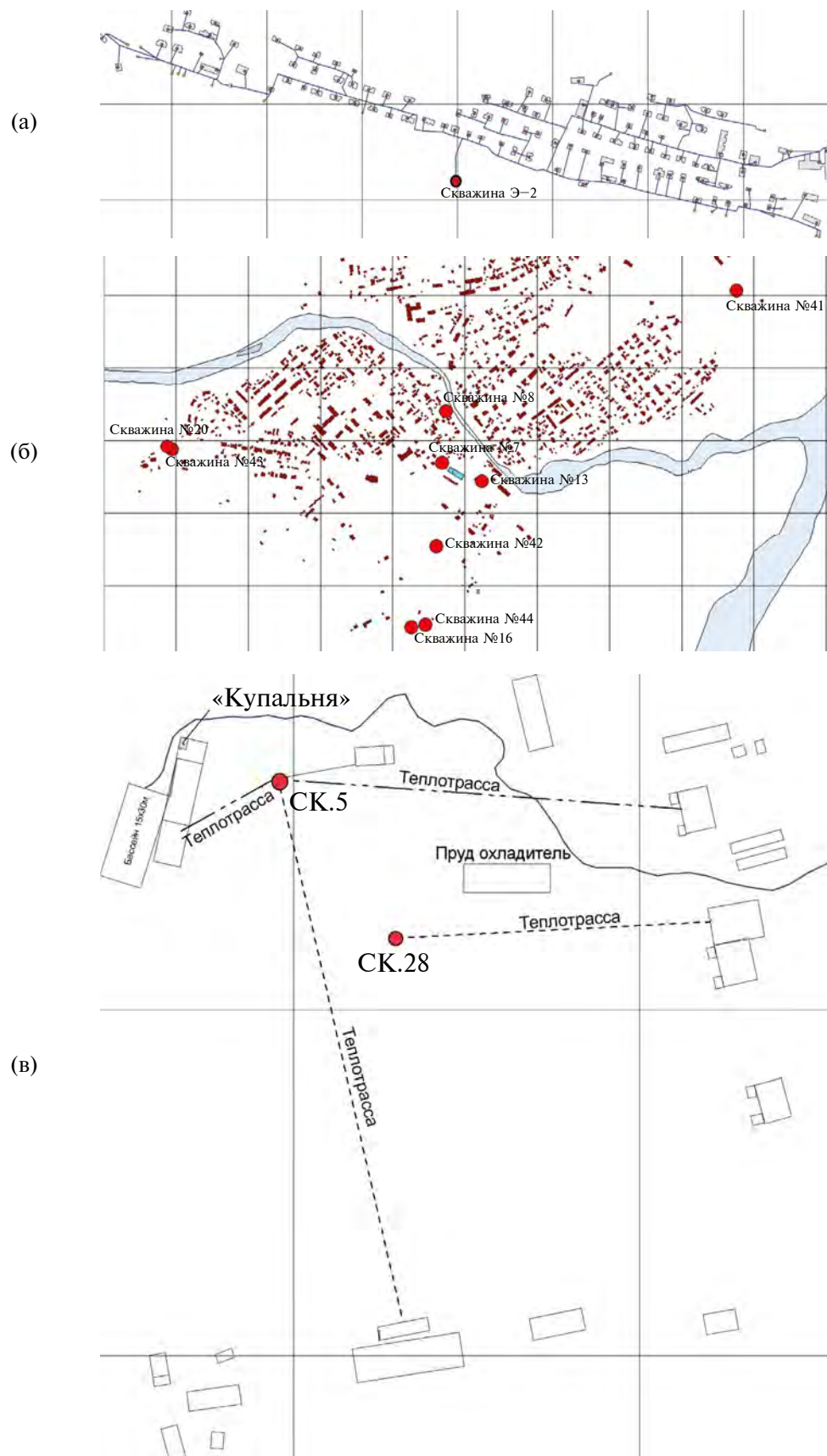


Рис. 2. Схема расположения эксплуатационных скважин на геотермальных месторождениях: а – Анавгайском (с. Анавгай), б – Эссовском (с. Эссо), в – Быстринском (пос. Горный ключ). Шаг сетки – 250 м.

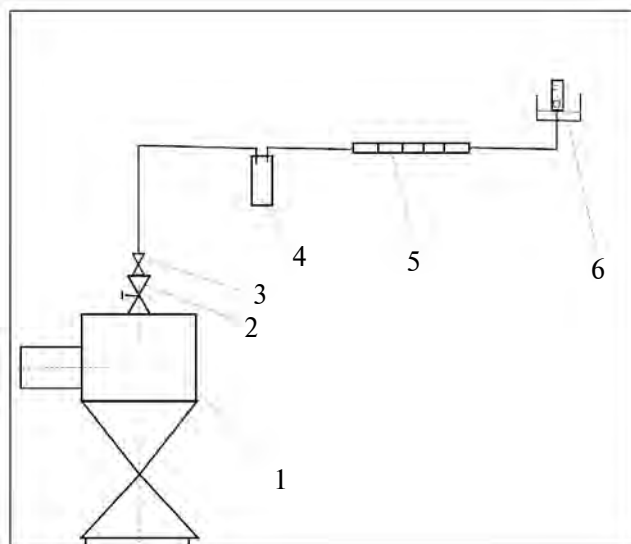


Рис. 3. Схема отбора проб газа с последовательно соединенными СК-13: 1 — оголовок скважины; 2 — шаровый кран отбора; 3 — регулирующий вентиль; 4 — влагоотделитель; 5 — батарея из СК-13; 6 — измеритель расхода газа объемным методом.

$t_{отб}$ — время отбора газа, с; 0.00755 — постоянная распада радона, 1/ч.

В лабораторных условиях измерения активности радона, абсорбированного в угле, для каждой СК-13 выполнялись по методике [6] на измерительных каналах комплекса “Камера 01”.

Время отбора проб на оголовке скважин составляло от 16 до 73 с. Максимальное время измерения на комплексе, согласно методике, выбиралось в процессе обработки данных программой “Радон98” до момента, при котором значения и погрешность расчетов практически не изменялись во времени.

Суммарная объемная активность радона в газе определялась по формуле методики [13] с учетом временного фактора:

$$Q = A \cdot \exp(0.0075 \cdot T_p) / (G \cdot t(1 - K_{пр})), \quad (2)$$

где A — суммарная активность радона в камере на угле по окончании отбора проб, Бк; T_p — время, прошедшее с окончания взятия пробы до проведения измерений на комплексе, ч; G — объемный средний расход газа, м³/с; 0.00755 — постоянная распада радона, 1/ч; t — время отбора пробы газа на СК-13, с; $K_{пр}$ — коэффициент проскока (согласно [6] принимался равным 0.1).

Предварительно на месторождениях проводились замеры фоновой радиации дозиметром QUANTUM/006-02497. Непосредственно рядом с местами пробоотбора измерения показали не-

высокий, естественный, характерный для данной местности фоновый уровень радиации — 13–18 мкР/ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку информации в литературных источниках по плотности потока радона на геотермальных месторождениях Быстринского района не обнаружено, были проведены предварительные замеры ППР и объемной активности радона в подвалах некоторых частных домов и гаражей с. Эссо, около скважин Э-2 Анавгайского и Быстринского месторождения (п. Горный ключ). Места установок НК-32 для оценки значений ППР выбирались в непосредственной близости от скважин, но за пределами площади бетонирования оголовка (~1 м), а также в расстоянии 100–250 м от скважин, чтобы исключить возможное влияние предполагаемых потоков радона вблизи скважин.

В некоторых местах на месторождениях были обнаружены достаточно высокие значения ППР, превышающие норму (допустимый уровень ППР с поверхности грунта на участках строительства зданий производственного назначения составляет 250 мБк/(м²·с), а для жилых зданий — 80 мБк/(м²·с)) (ОСПОРБ-99/2010). В других местах на месторождениях показания ППР соответствовали очень низким уровням 0–7 мБк/(м²·с), например, около скв. Э-2 ППР — 7 мБк/(м²·с), возле скв. 5 Быстринского месторождения ППР — 5 мБк/(м²·с) (см. рис. 2а, в). Все это говорит о неравномерности распределения радона на месторождениях.

Кроме того, измерялась ОАР в некоторых подвалах зданий. В одном из подвалов с. Эссо ее максимальные значения достигали 200–416 Бк/м³.

В дальнейшем необходимо проведение более детальной радоновой съемки. В представленном же материале основное внимание уделено экспериментальному обнаружению радона в попутных газах на оголовках действующих эксплуатационных скважин Анавгайского, Быстринского и Эссовского месторождений.

С учетом того, что химический состав воды на каждом месторождении относительно однороден, пробы термальной воды были отобраны выборочно с одной из скважин каждого месторождения (результаты приведены в табл. 1 и 2).

Количественное содержание химических элементов определяли с помощью эмиссионного спектрометра параллельного действия с индуктивно-связанной плазмой ICPE-9000 (“Shimadzu”, Япония), Методика М-02-1109-08 “Определение металлов в питьевой, минеральной, природной, сточной воде и в атмосферных осадках методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой с помощью спектрометра ICPE-9000”.

Таблица 1. Химический состав термальной воды на эксплуатационных скважинах геотермальных месторождений: Анавайское, Быстринское, Эссовское

Компоненты	Методика выполнения измерений	№ пробы Заказчика	Анавайское, скв. Э-2				Быстринское, скв. 28				Эссовское, скв. 44			
			ГХ-253				ГХ-254				ГХ-255			
		№ пробы лаборат.	(C±Δ) мг/дм³	ммоль-экв./дм³	%-ммоль-экв.	(C±Δ) мг/дм³	ммоль-экв./дм³	%-ммоль-экв.	(C±Δ) мг/дм³	ммоль-экв./дм³	%-ммоль-экв.	(C±Δ) мг/дм³	ммоль-экв./дм³	%-ммоль-экв.
			ПО, мг/дм³	8.44±0.02	—	<0.01	—	—	<0.01	8.56±0.02	—	0.064±0.015	0.003	0.02
pH	ПНД Ф 14.1:2.3:4.121-97	—												
Fe ^{3+*}	М-02-1109-08	0.01			—			—						
Li ⁺ *	М-02-1109-08	0.005		0.017	0.07	0.12±0.01	0.017	0.07	0.17±0.02	0.024	0.07	0.10±0.01	0.014	0.09
K ⁺	М-03-505-119-03	0.5		0.131	0.51	5.11±0.82	0.131	0.51	2.78±0.44	0.071	0.21	4.17±0.67	0.107	0.74
Ca ²⁺	ПНД Ф 14.1:2.95-97	1		12.725	49.79	255±18	12.725	49.79	247±18	12.325	37.09	110±8	5.49	37.77
Mg ^{2+*}	М-02-1109-08	0.01		—	—	<0.01	—	—	0.10±0.01	0.008	0.02	<0.01	—	—
Na ⁺	М-03-505-119-03	0.5		12.658	49.54	291±49	12.658	49.54	478±81	20.792	62.57	205±35	8.917	61.34
NH ₄ ⁺	ПНД Ф 14.1:2.1-95	0.05		0.005	0.02	0.09±0.02	0.005	0.02	0.08±0.02	0.004	0.01	<0.05	—	—
Str ^{2+*}	М-02-1109-08	0.1		0.019	0.07	0.83±0.09	0.019	0.07	0.40±0.05	0.009	0.03	0.27±0.03	0.006	0.04
Σкатионов				25.555	100	552.15	25.555	100	728.53	33.233	100	319.6	14.537	100
Cl ⁻	ПНД Ф 14.1:2.96-97	1		4.401	17.54	156±11	4.401	17.54	540±38	15.233	45.46	60.3±4.2	1.701	11.45
HCO ₃ ⁻	РД 52.24.493-2020	10		0.179	0.71	10.9±2.4	0.179	0.71	22.7±2.4	0.372	1.11	11.7±2.4	0.192	1.29
CO ₃ ²⁻	РД 52.24.493-2020	0.1		0.011	0.04	0.33±0.04	0.011	0.04	0.93±0.11	0.031	0.09	0.74±0.09	0.025	0.17
H ₂ BO ₃ ⁻	РД 52.24.389-2011	0.57		0.043	0.17	2.64±0.11	0.043	0.17	13.8±1.1	0.226	0.67	1.49±0.12	0.024	0.16
H ₃ SiO ₄ ⁻	РД 52.24.432-2018	0.1		0.053	0.21	5.0±0.28	0.053	0.21	2.50±0.16	0.026	0.08	9.0±0.46	0.095	0.64
SO ₄ ²⁻	ГОСТ 23268.4-78	1		20.4	81.29	980±78	20.4	81.29	845±68	17.6	52.53	615±49	12.8	86.16
NO ₂ ⁻	ПНД Ф 14.1:2.3-95	0.02		—	—	<0.02	—	—	<0.02	—	—	<0.02	—	—
NO ₃ ⁻	ПНД Ф 14.1:2.4-95	0.02		0.009	0.04	0.55±0.10	0.009	0.04	0.65±0.12	0.01	0.03	1.20±0.22	0.019	0.13
PO ₄ ²⁻	ПНД Ф 14.1:2.112-97	0.05		—	—	<0.05	—	—	0.24±0.04	0.008	0.03	<0.05	—	—
Σанионов				25.096	100	1155.42	25.096	100	1425.82	33.506	100	699.43	14.856	100
H ₃ BO ₃	РД 52.24.389-2011	0.57				10.6±0.8			48.8±3.9			3.31±0.26		
H ₄ SiO ₄ раств.	РД 52.24.432-2018	0.1		95.0±4.3		47.2±2.2			104±5					
Минерализация				1813		2250			1126					
Электропроводность, мкСм/см	РД 52.24.495-2005	4		2744±165		3960±238			1411±85					

* Определения выполнены на спектрометре атомно-эмиссионном с индуктивно-связанной плазмой IСПЕ-9000 (протокол № 250 от 19.02.2024 г.) Лаборатория НИИГТЦ ДВО РАН.

Таблица 2. Микрокомпонентный состав воды месторождений Быстринской гидротермальной системы*

Элемент, мг/л	Месторождение, скважина, дата, время		
	Анавгайское, скв. Э-2, 09.02.24, 13:00	Быстринское скв. 28, 09.02.24, 14:00	Эссовское скв. 44, 08.02.24, 09:50
	ГХ-253	ГХ-254	ГХ-255
Al	<0.01	<0.01	<0.01
As	<0.05	0.28±0.04	<0.05
B	1.98±0.42	7.97±1.67	0.86±0.18
Ba	<0.01	<0.01	<0.01
Co	<0.01	<0.01	<0.01
Cr	<0.01	<0.01	<0.01
Cu	<0.01	<0.01	<0.01
Fe	<0.01	<0.01	0.064±0.015
Li	0.12±0.01	0.17±0.02	0.1±0.01
Mg	<0.01	0.1±0.01	<0.01
Mn	<0.01	<0.01	<0.01
Mo	0.013±0.003	0.017±0.004	0.012±0.003
Ni	<0.01	<0.01	<0.01
Pb	<0.01	<0.01	<0.01
Sb	<0.01	<0.01	<0.01
Sr	0.83±0.09	0.40±0.05	0.27±0.03
Zn	<0.01	<0.01	<0.01

*К протоколу № 251-253 Методика анализа М-02-1109-08, прибор — ICPE-9000. Погрешность результатов измерений не превышает допустимую. Лаборатория НИГГЦ ДВО РАН.

Содержание калия и натрия определяли с использованием атомно-абсорбционного спектрометра AA-7000 (“Shimadzu”, Япония); кальция, магния, хлорид- и сульфат-ионов — титриметрическим методом; кремниевой кислоты, нитрат- и нитрит-ионов — фотоколориметрически; pH измеряли с использованием pH-метра pH-150МИ (“Измерительная техника”, Россия). Номера методик указаны во второй графе протокола (см. табл. 1). Схема расположения точек измерения плотности потока радона на Быстринском месторождении показана на рис. 4.

Предварительные измерения ППР на Быстринском месторождении (см. рис. 2в) подтвердили предположение о наличии устойчивого потока радона, максимальное значение было установлено

в крытом бассейне — “купальне”⁸. Накопительные камеры НК-32 № 129, 138 размещались в “купальне” и устанавливались на специальный поплавок, который свободно плавал по поверхности воды. Измерения проводились также и в других местах месторождения с поверхности почвы, в том числе возле скважин, где ППР была незначительной. Результаты измерений ППР на Быстринском месторождении и координаты точек отбора приведены в табл. 3.

⁸ Крытая “купальня” — железобетонный короб, глубина источника 0.7 м (размеры водной поверхности, огражденной коробом 1.97 × 3.57 м), со дна источника выходят струи горячей воды, содержащие небольшое количество газа. Измерения температуры термальной воды на глубине 0.15 м от поверхности дна показали значения 45.9–46.2°C. Измерения температуры были произведены термометром Testo 925 Testo AG Germany 0560.9250/с зондом.



Рис. 4. Схема расположения точек измерения ППР на Быстринском месторождении (номер соответствует номеру камеры СК-13 в табл. 2). Темный прямоугольник слева — термальный бассейн.

На втором этапе исследований проводились замеры ОАР в попутном газе на оголовках скважин. Отбор проб газа производился с верхней части оголовков всех эксплуатационных скважин Эссовского (скв. 7, 8, 13, 16, 20, 41–44), Анавгайского (скв. Э-2) и Быстринского месторождений (скв. 5, 28) (см. рис. 2). Исследовались только эксплуатационные скважины, работающие в режиме самоизлива. Обработка результатов показала наличие радона в попутных газах во всех опробованных скважинах. К сожалению, не удалось провести отбор газа на скв. 16, 41, 44 Эссовского месторождения и скв. 5 Быстринского месторождения из-за отсутствия газовой фазы на их оголовках, что связано, по-видимому, с конструктивными особенностями этих скважин и, возможно, с режимом эксплуатации.

Результаты измерений активности радона по Анавгайской скв. Э-2, и Быстринской скв. 28 приведены в табл. 4. Расход газа составлял 2 л/мин, время отбора — 60 с. Измерения проводились 09.02.2024 г. Данные, приведенные в табл. 4, подтверждают выводы работы [8], при выбранных условиях эксперимента практически 99% радона улавливаются в первой по ходу газов СК-13.

В табл. 5 и на рис. 5 приведены данные по измерениям активности радона на Эссовском месторождении. Какой-либо зависимости распределения активности радона в эксплуатационных скважинах от химического состава вод, глубины и других условий не обнаружено.

Отметим, что на Камчатке в ксенолитах и вулканических породах относительно малое содержание (ниже кларковых значений) материнского урана ^{238}U , из которого образуется дочерний изотоп радий ^{226}Ra , являющийся источником радона ^{222}Rn . Но вместе с тем в газах источников и фумаролах содержатся достаточно высокие концентрации радона [3, 18], что само по себе необычно. Предполагается, что радон образуется в эмануирующем

коллекторе радия, поскольку глубина образования и условия возникновения такого коллектора аналогичны с гидротермальными месторождениями: температура $\sim 150^\circ\text{C}$ и, по оценке [2], глубина, измеряемая сотнями метров. Учитывая, что исследуемые месторождения имеют температуру ниже ($75\text{--}85^\circ\text{C}$), предполагаемая глубина образования эмануирующих коллекторов, по-видимому, может достигать нескольких километров, и, как следствие, значения ОАР ниже зафиксированных в фумарольных газах и высокотемпературных геотермальных источниках Узонских, Паужетских, Больше-Банных, Киреунских и т.п. [18].

Растворимость радона в жидкостях определяется температурой (t) и подчиняется закону Генри, коэффициент растворимости α_p :

$$\alpha_p = 0.106 + 0.405 \exp(-0.05t). \quad (3)$$

При этом α_p зависит также от содержания солей в геотермальной воде, причем с ростом солесодержания коэффициент растворимости уменьшается. Данная закономерность распределения радона отмечена в [14], α_p в основном зависит от химического состава и температуры воды и не зависит от происхождения газовой фазы и давления газа. В соответствии с уравнением (3), при характерной температуре воды на гидротермальных месторождениях Быстринского района большая часть радона должна находиться в попутном газе (на Эссовском месторождении при 75°C коэффициент растворимости радона в воде должен составлять 0.116, на Анавгайском при 82°C — 0.113, на Быстринском при 46°C — 0.15. Таким образом, следует ожидать значение ОАР, растворенного в термальной воде скважин, незначительным, что при использовании попутного газа позволит, предположительно, отнести данные гидротермальные месторождения к группе вод очень слаборадоновые ($185\text{--}750$ Бк/л) по классификации [7].

Таблица 3. Результаты измерения плотности потока радона с поверхности грунта на участке около “купальни” Быстринского геотермального месторождения (пос. Горный ключ)

Дата и время измерения	Место пробоборбор	Пробоборбор, дата, время		Результаты измерения		Основание	Координаты точки отбора	Номер измеренной пробы
		начало	окончание	мБк/(м ² ·с)	погр.			
17.11.2022 17:00	В 1 м от “Купальни”	17.11.2022 12:42	17.11.2022 13:42	24	15	Песок	56°1'26.86" с.ш. 159°5'19.22" в.д.	№166
17.11.2022 18:00	“Купальня”	17.11.2022 13:04	17.11.2022 14:04	21	15	Поверхность воды	56°1'26.75" с.ш. 159°5'19.33" в.д.	№138
17.11.2022 19:00	“Купальня”	17.11.2022 13:04	17.11.2022 14:04	201	34	Поверхность воды	56°1'26.75" с.ш. 159°5'19.42" в.д.	№129
17.11.2022 18:00	“Беседка”	17.11.2022 13:14	17.11.2022 14:14	0	14	Супесь	56°1'26.78" с.ш. 159°5'21.16" в.д.	№167
17.11.2022 20:00	В 1 м от скв. №5	17.11.2022 12:45	17.11.2022 13:45	5	14	Грунт, супесь	56°1'25.94" с.ш. 159°5'20.15" в.д.	№116
17.11.2022 20:00	Около д. 1	17.11.2022 13:05	17.11.2022 14:05	0	15	Супесь	56°1'27.43" с.ш. 159°5'23.28" в.д.	№199
17.11.2022 20:00	Около д. 3	17.11.2022 13:12	17.11.2022 14:12	1	7	Грунт, супесь	56°1'27.63" с.ш. 159°5'22.96" в.д.	№149
17.11.2022 20:00	Около д. 2	17.11.2022 13:09	17.11.2022 14:09	0	14	Супесь	56°1'26.16" с.ш. 159°5'24.27" в.д.	№186

Таблица 4. Результаты измерения активности радона в пробах угля сорбционных камер в скв. Э-2 Анавгайского и скв. 28 Быстринского геотермальных месторождений

Скважина/номер СК по ходу газа	Активность радона в угле		Объемная активность радона в попутном газе на оголовке скважины	
	Бк	погр.	Бк/м ³	погр.
Э-2/1	99.667	0.471	54 800	8 200
Э-2/2	0.701	0.104	386	120
Э-2/3	0.192	0.129	105	140
Э-2/4	0	0.191	0	210
Э-2/5	0	0.197	0	210
28/1	33.332	0.297	18 300	2 700
28/2	0	0.139	0	150
28/3	0	0.14	0	150
28/4	0.121	0.12	67	130
28/5	0.171	0.138	94	150

Таблица 5. Результаты измерения активности радона в пробах угля сорбционных камер (СК) в скважинах Эс-совского геотермального месторождения

Скважина/номер СК по ходу газа	Продолжительность отбора газа, с	Объем прокаченного газа, л	Активность радона в угле		ОАР в газе на оголовке скважины
			Бк	погр.	Бк/м ³
20/1	73	0.023	19.554	0.222	951 749
43/1	27	0.35	21.214	0.188	68 364
43/2	27	0.35	2.077	0.298	6 643
7/1	41	0.25	213.72	1.733	964 222
7/2	41	0.25	19.115	0.372	86 239
7/3	41	0.25	0.434	0.285	1 958
7/4	41	0.25	0	0.294	0
13/1	45	0.04	23.905	0.211	669 027
13/2	45	0.04	0.06	0.117	1 705
13/3	45	0.04	0	0.395	0
42/1	40	0.3	128.71	0.582	483 908
42/2	40	0.3	29.058	0.258	109 249
42/3	40	0.3	2.274	0.121	8550
42/4	40	0.3	0	0.108	0
8/1	16	0.3	22.575	0.405	85 514
8/2	16	0.3	6.927	0.209	26 239

Примечание: на каждой скважине использовалось по 5 последовательно соединенных сорбционных колонок, колонки, где активность радона не обнаружена — в таблице не приведены.



Рис. 5. Активность радона в угле сорбционных камер (СК-13 измерительного комплекса “Камера 01”) по скважинам Эссовского геотермального месторождения.

Наличие радона в скважинах гидротермальных месторождений Быстринского района открывает большие перспективы развития курортной базы в данном регионе. Радон при наружном контакте с кожей человека оказывает сильный бальнеологический эффект, даже если концентрация его незначительна. Радон имеет малый период полураспада (3.82 сут), вследствие чего относительно быстро выводится из организма (период полувыведения ~ 0.5 ч). Альфа-излучение в небольших дозах стимулирует процессы регенерации в клетках и органах человека [16]. Радонотерапия способствует лечению суставов, переломов и прочих травм. Воспалительные процессы подавляются, болевые ощущения снижаются, увеличивается подвижность суставов [14]; радон способствует восстановлению хрящевой ткани, тогда как многие лекарства производят противоположный эффект. Лечение радоном рекомендовано страдающим остеопорозом, так как при этом активизируется обмен кальция в костной ткани. Немаловажно, что радоновые процедуры обладают относительно длительным воздействием, так как стимулируют иммунную систему, а медикаментозные препараты обладают кратковременным эффектом.

Следует отметить, что бальнеологическое влияние на организм определяет не только концентрация радона, а и совокупные факторы: температура воды, химический состав (см. табл. 1, 2), наличие других газов и т.п. Для месторождений Быстринского района требуется дальнейшее детальное исследование влияния на организм человека элементного состава геотермального флюида в сочетании с радоном.

В то же время радон обладает канцерогенным эффектом, поэтому необходимо более глубокое изучение распределения радона на Эссовском, Анавгайском и Быстринском месторождениях с целью выявления мест с ППР, превышающей нормативные значения для участков строящихся общественных и жилых зданий ($80 \text{ мБк/м}^2\text{с}$) и производственных зданий ($250 \text{ мБк/м}^2\text{с}$), а при превышении данных значений при строительстве (в том числе и курортной инфраструктуры) необходимо проведение радонозащитных мероприятий.

Поскольку в системы отопления домов с Эссо, с. Анавгай и пос. Горный ключ подается непосредственно геотермальная вода, часть радона (помимо поступления из почвы в подвалы домов) поступает по трубопроводам в дома, что также требует проведения отдельного мониторинга, комплексной оценки потоков радона и разработки (при необходимости) защитных мероприятий.

Теоретически, исходя из закона Генри (3), следует ожидать низкую концентрацию радона в геотермальной воде. Из-за отсутствия прибора для измерения радона в воде не проводились натурные исследования содержания радона непосредственно в жидкой фазе, это перспективное направление дальнейших исследований.

Кроме того, мониторинг радона в скважинах геотермальных месторождений открывает перспективы отслеживания изменений его концентрации для прогноза извержений вулканов и землетрясений.

ВЫВОДЫ

Изучение экологии геотермальной провинции Быстринского района Камчатского края выявило наличие радона в попутном газе большей части эксплуатационных скважин на гидротермальных месторождениях Эссовское, Анавгайское, Быстринское. Измерения активности радона проводились с помощью комплекса “КАМЕРА-01”. Измеренная активность радона на угле сорбционной колонки (от 0.06 до 233 Бк). Какой-либо закономерности влияния различных факторов на проявления радона в скважинах пока не установлено.

В результате исследований сделан предварительный вывод, что геотермальные месторождения Быстринской гидротермальной системы можно отнести к источникам группы VI (радоновые) по классификации [11] (очень слаборадоновые).

Результаты выполненных исследований показывают необходимость дальнейшего целенаправленного изучения месторождений и разработки рекомендаций для снижения экологического воздействия на экосистему и открывают перспективы создания курортно-санаторных комплексов в Быстринском районе Камчатского края.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Азаев Ю.Л.* Радиационно-гигиеническая обстановка в предгорьях Алтая и ее оптимизация на курорте Белокуриха: дис. ... канд. мед. наук, Кемерово, 1997. 130 с.
2. *Андреев В.И.* Распределение естественных радиоактивных элементов в твердых вулканитах и радиогенных газах из вулканов и гидротерм Камчатки и Курил. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2013. 158 с.
3. *Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф.* Каталог термальных источников (с дополнениями Манухина Ю.Ф. и Кирюхина А.В.). <https://sites.google.com/site/geobelousov/geothermalnaa-karta> (дата обращения: 23.05.2023)
4. *Иванов В.В., Невраев Г.А.* Классификация подземных минеральных вод. М.: Недра, 1964. 168 с.
5. *Кирюхин А.В., Сугробов В.М.* Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 50–65. doi: 10.31857/S0203-03062019650-65
6. Комплекс измерительный для мониторинга радона “Камера-01”. Руководство по эксплуатации. М.: НТЦ “Нитон”, 2003. 24 с.
7. *Куликов Г.В., Жевлаков А.В., Бондаренко С.С.* Минеральные лечебные воды СССР: Справочник. М.: Недра, 1991. 399 с.
8. *Кургуз С.А.* Аппаратная адаптация методики НТЦ “Нитон” к решению задачи “экспрессной” оценки величины плотности потока радона с поверхности грунта // Молодежь и наука: Сб. матер. VIII Всерос. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посв. 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2012. [Электронный ресурс]. <https://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section04.html>
9. *Лодис Ф.А., Семенов В.И.* Камчатка — край лечебный. Петропавловск-Камчатский: Дальневост. кн. изд-во, Камч. Отд., 1993. <http://www.kscnet.ru/ivs/publication/semenov/index.html> (дата обращения: 23.05.2023)
10. *Максимовский В.А., Решетов В.В., Харламов М.Г.* Карта радоноопасности России. Масштаб 1:10 000 000 / Под ред. Смыслова А.А. М., СПб.: СПбГГИ, 1995. <https://u.9111s.ru/uploads/202302/04/d2d4d680bd5c18b68e8dd635c5351767.png> (дата обращения: 23.05.2023).
11. *Манухин Ю.Ф., Петров М.А.* Ресурсная база санаторно-курортного строительства в Камчатском Крае // Матер. Всерос. науч. конф. 22–27 сентября 2008 г. “100-летие Камчатской экспедиции Русского географического общества 1908–1910 гг.”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 190–198.
12. *Микляев П.С.* Научные основы оценки потенциальной радоноопасности платформенных территорий: дисс. ... док. геол.-мин. наук. М.: ИГЭ РАН, 2015. 307 с. <https://studfile.net/preview/5289086/page:2/>
13. Объемная активность радионуклидов в воздухе на рабочих местах. Требования к определению среднегодовой объемной активности. Методические указания МУ 2.6.5.009-2016. М.: Официальное издание, 2016.
14. *Панов С.В.* Комплексное лечение больных коксартрозом и гонартрозом с применением радонового эманатора: автореф. дисс. ... канд. мед. наук. Ульяновск: УГУ, 2011. 20 с.
15. Радон, радоноterapia, радоновые источники, радоновые ванны, радоновые орошения. <http://sankurtur.ru/methods/376/> (дата обращения: 23.05.2023)
16. *Самосюк И.З., Федоров С.Н., Думин П.В.* Радоноterapia: проблемы и перспективы // Укр. мед. часопис. 2000. № 2. С. 119–123.
17. *Семинский А.К.* Радон в обводненных разломных зонах Байкальского рифта: дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2018. 170 с.
18. *Чирков А.М.* О радоновых водах на Камчатке // Вопросы географии Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 1970. Вып. 6. С. 173.
19. https://бмэ.орг/index.php/МЫШЬЯКОВИСТЫЕ_ВОДЫ (дата обращения: 13.05.2023)
20. <https://cyberleninka.ru/article/n/preparaty-bora-v-psihiatrii-i-nevrologii-ih-vzlyot-padenie-i-vozobnovlenie-interesa> (дата обращения: 13.05.2023)
21. <https://svyato.info/14333-bystrinskie-termomineralnye-istochniki-u-sela-anavgay.html> (дата обращения: 23.05.2023).
22. http://www.sgan2009.ru/Ictochniki_Kamchatki/47_km_1/47_km_1.html (дата обращения: 23.05.2023)
23. <http://profbeckman.narod.ru/rad.files/Rad3SS.pdf> (дата обращения: 23.05.2023)

ASSESSMENT OF RADON MANIFESTATION AT HYDROTHERMAL DEPOSITS OF THE BYSTRINSKY DISTRICT, KAMCHATKA

V. A. Kudryashov

*Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
Severo-Vostochnoe shosse 30, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002, Russia*

E-mail: vladimirkudryasho@yandex.ru

The Kamchatka area has significant hydrothermal resources — according to some estimates, up to 80% of the total mineral water in Russia. The main thermal mineral resources have been developed near the regional center of Petropavlovsk-Kamchatsky. At the same time, many hydrothermal resources located at a considerable distance from the regional center in ecologically clean areas are insufficiently studied. One of these areas is Bystrinsky district, located in the center of Kamchatka, where three hydrothermal fields have been explored and used for heating needs, i.e., Anavgayskoye (82°C), Bystrinsky (48°C), Essovskoye (78°C). According to the chemical composition of water in these field, calcium-sodium sulfate waters are similar in composition and mineralization (1.0-2.6 g/dm³). The purpose of the study was to search for radon in these fields. Information about the presence of radon in these fields was not previously found in publications. A preliminary assessment of the radon presence in the associated gas in the wells of Anavgaysky, Bystrinsky and Essovsky geothermal fields was carried out using the measuring complex “CAMERA-01” (NTC “Niton”) for monitoring radon. Sampling was carried out on coal sorption columns directly on the heads of production wells. The sampling time, the number of columns and the gas flow rate from the top of the wellhead were selected taking into account the maximum radon capture. As a result of measurements in the associated gas of production wells of geothermal fields, significant concentrations of radon were found somewhere. The measured radon activity at the coal of the “CAMERA-01” complex ranged from 0.4 to 233 Bq. The analysis of the micro-component composition (device — ICPE-9000 laboratory of the RGTC FEB RAS) showed an increased content of boron — 7.97 mg/l, strontium — 0.83 mg/l and molybdenum — 0.017 mg/l in the deposits. No dependence of radon activity in production wells on the chemical composition, depth of wells, etc., was found in the fields. The presence of radon in the wells of hydrothermal fields opens up prospects for the development of resort and sanatorium complexes in the Bystrinsky district, Kamchatka, Russia.

Keywords: *radon, well, hydrothermal spring, balneology, spa and sanatorium complex, Essovskoye, Anavgayskoye and Bystrinsky deposits, Bystrinsky district, Kamchatka*

REFERENCES

1. Azaev, Yu.L. [Radiation-hygienic situation in the foothills of the Altai and its optimization in the resort of Belokurikha]. Cand. Sci. (Medical) Dis., Kemerovo, 1997, 130 p. (in Russian)
2. Andreev, V.I. [Distribution of natural radioactive elements in solid volcanites and radiogenic gases from volcanoes and hydrotherms of Kamchatka and the Kuriles]. Petropavlovsk-Kamchatsky, Vitus Bering KamSU, 2013, 158 p. (in Russian)
3. Vakin, E.A., Pilipenko, G.F. [Catalog of thermal springs (with additions by Manukhin Yu.F. and Kiryukhin A.V.)]. <https://sites.google.com/site/geobelousov/geotermalnaa-karta> (accessed 05.23.2023) (in Russian)
4. Ivanov, V.V., Nevraev, G.A. [Classification of underground mineral waters]. Moscow, Nedra Publ., 1964, 168 p. (in Russian)
5. Kiryukhin, A.V., Sugrobov, V.M. [Geothermal resources of Kamchatka and the nearest prospects for their development]. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2019, no 6, pp. 50–65. DOI: 10.31857/S0203-03062019650-65 (in Russian)
6. [Measuring complex for radon monitoring “Camera-01”]. Operation manual. Moscow, NTC Niton, 2003, 24 p. (in Russian)
7. Kulikov, G.V., Zhevnikov, A.V., Bondarenko, S.S. [Mineral medicinal waters of the USSR]. Guidebook. Moscow, Nedra Publ., 1991, 399 p. (in Russian)
8. [Hardware adaptation of the Niton Scientific Research Center methodology to solving the problem of “express” estimation of the radon flux density from the soil surface]. In: [Youth and Science. Proc. VIII All-Russia Sci. and Techn. Conf. of students, postgraduates and young professionals dedicated to the 155th birthday of K.E. Tsiolkovsky]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2012. (Electronic resource). <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section04.html> (in Russian)
9. Lodis, F.A., Semenov, V.I. [Kamchatka is a therapeutic region.] Petropavlovsk-Kamchatsky, Far Eastern Publishing House, Kamchatka division, 1993. <http://www.kscnet.ru/ivs/publication/semenov/index.html> (accessed: 05/23/2023) (in Russian)
10. Maksimovskii, V.A., Reshetov, V.V., Kharlamov, M.G. [Map of radon hazard in Russia. Scale 1:10 000 000]. Smyslova A.A., Ed. Moscow, St. Petersburg: SPbGGI Publ., 1995. <https://u.9111s.ru/uploads/202302/04/d2d4d680bd5c18b68e8dd635c5351767.png> (accessed 05.23.2023). (in Russian)

11. Manukhin, Yu.F., Petrov, M.A. [Resource base of sanatorium-resort construction in the Kamchatka Territory]. In: [Proc. All-Russia Sci. Conf., Sept. 22–27, 2008 “The 100th anniversary of the Kamchatka expedition of the Russian Geographical Society 1908–1910”]. Petropavlovsk-Kamchatsky, IViS FEB RAS, 2009, pp. 190–198. (in Russian)
12. Miklyaev, P.S. [Scientific foundations for assessing the potential radon hazard of platform territories]: Doctoral Sci. (Geol.-Min.) Diss. Moscow, IEG RAS, 2015, 307 p. <https://studfile.net/preview/5289086/page:2> (in Russian)
13. [Volumetric activity of radionuclides in the air at workplaces. Requirements for determining the average annual volume activity. Methodological guidelines of MU 2.6.5.009-2016]. Moscow, Official publication, 2016. (in Russian)
14. Panov, S.V. [Complex treatment of patients with coxarthrosis and gonarthrosis using radon emanatorium]. Extended Abstract of Cand. Sci. (Mediacal) Diss. UGU, 2011. Ulyanovsk, 20 p. (in Russian)
15. [Radon, radon therapy, radon springs, radon baths, radon irrigation]. <http://sankurtur.ru/methods/376> / (accessed: 05.23.2023) (in Russian)
16. Samosyuk, I.Z., Fedorov, S.N., Dumin, P.V. [Radon therapy: problems and prospects]. *Ukr. Med. chasopis*, 2000, no. 2, pp. 119–123. (in Russian)
17. Seminskii, A.K. [Radon in the watered fault zones of the Baikal rift]. Cand. Sci. (Geol.-Min.) Diss. Irkutsk, 2018 170 p. (in Russian)
18. Chirkov, A.M. [On radon waters in Kamchatka]. *Voprosy geografii Kamchatki*, 1970, no. 6, pp. 173. (in Russian)
19. https://бмэ.опг/index.php/мышьяковистые_воды (accessed 05.23.2023) (in Russian)
20. <https://cyberleninka.ru/article/n/preparaty-bora-v-psihiatrii-i-nevrologii-ih-vzlyot-padenie-i-vozobnovlenie-interesa> (accessed 05.23.2023) (in Russian)
21. <https://svyato.info/14333-bystrinskie-termomineralnye-istochniki-u-sela-anavgay.html> (accessed 05.23.2023). (in Russian)
22. http://www.sgan2009.ru/Ictochniki_Kamchatki/47_km_1/47_km_1.html (accessed 05.23.2023) (in Russian)
23. <http://profbeckman.narod.ru/rad.files/Rad3SS.pdf> (accessed 05.23.2023) (in Russian)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 543.3

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРУНТОВЫХ ВОД В ДЕЛЬТЕ РЕКИ МЕКОНГ

© 2025 г. М. В. Болгов², А. К. Кулик², Н. Ч. Хиен¹, В. Т. М. Чау¹, Ч. Т. Л. Тху¹,
Р. Н. Балкушкин^{2,*}, А. А. Выприцкий², А. А. Васильченко²

¹Южное отделение Совместного Российско-Вьетнамского Тропического
научно-исследовательского и технологического центра, 3-я ул. 3/2, район 10, Хошимин, Вьетнам
²Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН,
пр. Университетский 97, Волгоград, 400062 Россия

*E-mail: balkushkin_r@vifanc.ru

Поступила в редакцию 02.09.2024 г.

После доработки 15.10.2024 г.

Принята в печать 20.02.2025 г.

Дельта реки Меконг — крупный сельскохозяйственный регион Вьетнама, обеспечивающий продовольственную безопасность и поддерживающий экспортный потенциал страны. Возможность эффективно ведения сельского хозяйства предполагает наличие точной информации о состоянии грунтовых вод и оценки как природных, так и антропогенных факторов, определяющих их химический состав. Цель исследования заключалась в изучении динамики химического состава грунтовых вод в дельте реки Меконг за сухой сезон 2022–2023 гг., в рамках которой в четырех провинциях из первого водоносного горизонта было отобрано 23 пробы воды в ноябре 2022 г. (начало сухого периода) и 23 пробы в марте–апреле 2023 г. (конец сухого периода). Образцы грунтовых вод были проанализированы на содержание основных ионов. По результатам исследований выявлено, что за сухой сезон 2022–2023 гг. грунтовые воды с 8 ключевых участков изменили гидрохимический тип: с I на II и IV, с II на IV, с III на II и IV, с IV на I (согласно диаграмме Пайпера). Наиболее существенное изменение химического состава произошло в пресных грунтовых водах. Смена гидрохимического типа может обуславливаться использованием оросительной воды различного состава, применением средств химической защиты растений и удобрений на сельскохозяйственных угодьях, динамикой интрузии морских вод, атмосферными осадками и сбросом сточных вод.

Ключевые слова: грунтовые воды, дельта Меконга, ионный состав воды, гидрохимические типы воды, интрузия морских вод

DOI: 10.31857/S0869780925020037 EDN: EPORXW

ВВЕДЕНИЕ

Дельта реки Меконг, занимающая около 12% от всей площади Социалистической Республики Вьетнам, — важный регион страны, который обеспечивает продовольственную безопасность и поддерживает экспортный потенциал [6]. Здесь располагается 53.5% посевных площадей риса с наиболее высокой средней урожайностью по стране (61.9 ц/га), с которых ежегодно собирается 23.5 млн т урожая. Значительная территория занята плантациями плодовых культур, с которых ежегодно получают около 50% всех фруктов. В пределах дельты Меконга находится более 70% площадей аквакультуры с общей годовой продуктивностью 3.7 млн т [15].

В настоящее время, в связи с экономическим развитием Вьетнама, регион сталкивается с проблемой обеспечения своей устойчивости. Реализация хозяйственных проектов зачастую подразумевает использование потенциала р. Меконг и прилегающих к нему территорий, что повышает вероятность возникновения неблагоприятных ситуаций, определяющихся сложным взаимодействием природных и социально-экономических факторов [6, 8].

Одна из основных задач на территории дельты р. Меконг — рациональное использование водных ресурсов в условиях сезонности климата и интрузии морской воды. Наряду с поверхностными водами, важную роль в осуществлении хозяйственной

деятельности играют грунтовые воды. Как правило, они залегают неглубоко и принимают активное участие в водном питании растений. Возможность эффективного ведения сельского хозяйства предполагает наличие точной информации о состоянии грунтовых вод и оценки как природных, так и антропогенных факторов, определяющих их химический состав.

Цель исследования — изучение динамики химического состава грунтовых вод в дельте р. Меконг за сухой сезон 2022–2023 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках исследований из первого водоносного горизонта ручным буром с помощью пробоотборника грунтовых вод было отобрано 23 пробы воды в ноябре 2022 г. (начало сухого периода) и 23 пробы в марте–апреле 2023 г. (конец сухого периода).

Образцы грунтовых вод были проанализированы на содержание основных ионов. Для определения Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- использовалась система капиллярного электрофореза “Капель-105м”, HCO_3^- , CO_3^{2-} определялись титриметриче-

ским методом [5], сухой остаток — гравиметрическим методом [7].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований располагается в дельте р. Меконг в провинциях Анзянг, Виньлонг, Бенче, Тьянзянг Республики Вьетнам (рис. 1). Ключевые участки представляли собой возделываемые сельскохозяйственные поля, плантации плодовых культур, неэксплуатируемые земли.

Климат имеет ярко выраженную сезонность: май–ноябрь — влажный период, декабрь–апрель — сухой. Среднегодовое количество осадков варьирует от 1400 до 2400 мм, причем более 90% выпадает во время влажного сезона и менее 10% — в сухой период [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Геохимия дельтовых ландшафтов определяется процессами в расположенных выше звеньях речной системы, условиями ландшафтообразования самой дельты и морем, обеспечивающим

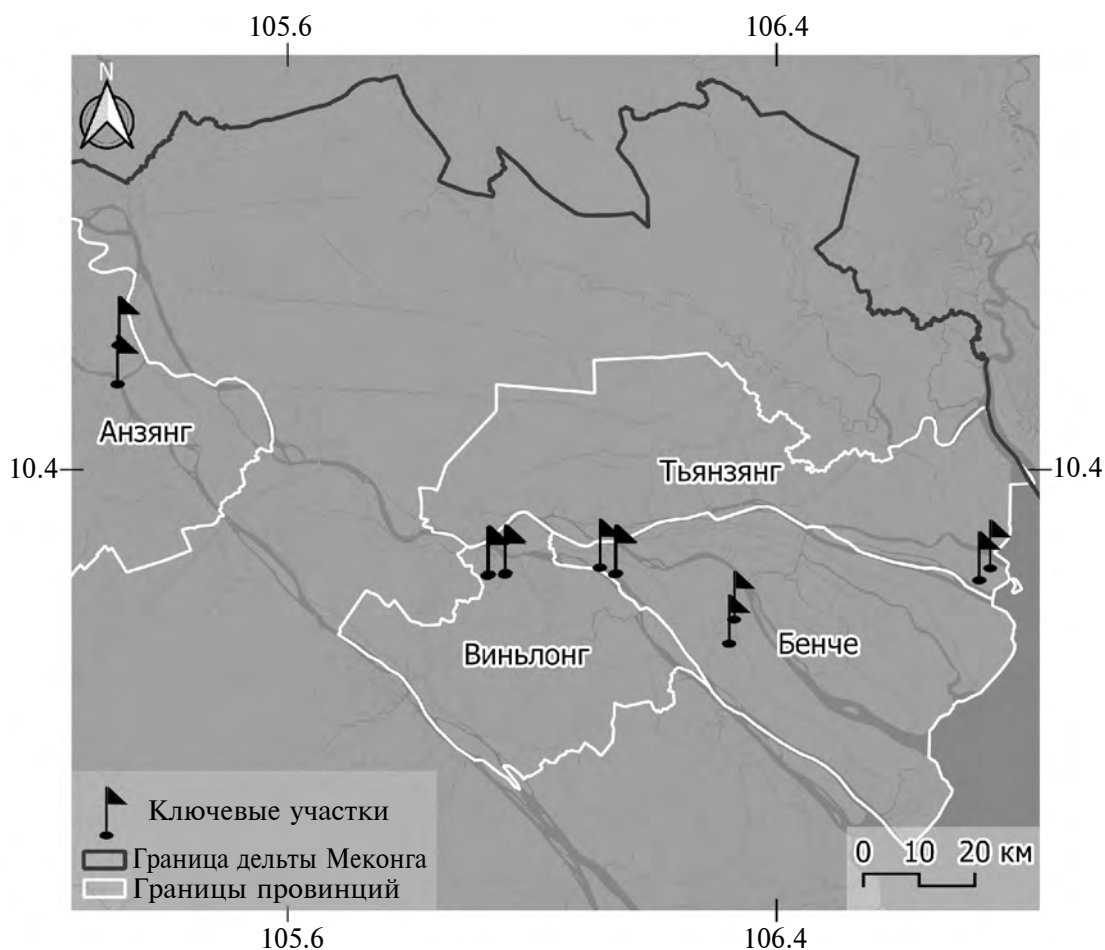


Рис. 1. Расположение ключевых участков.

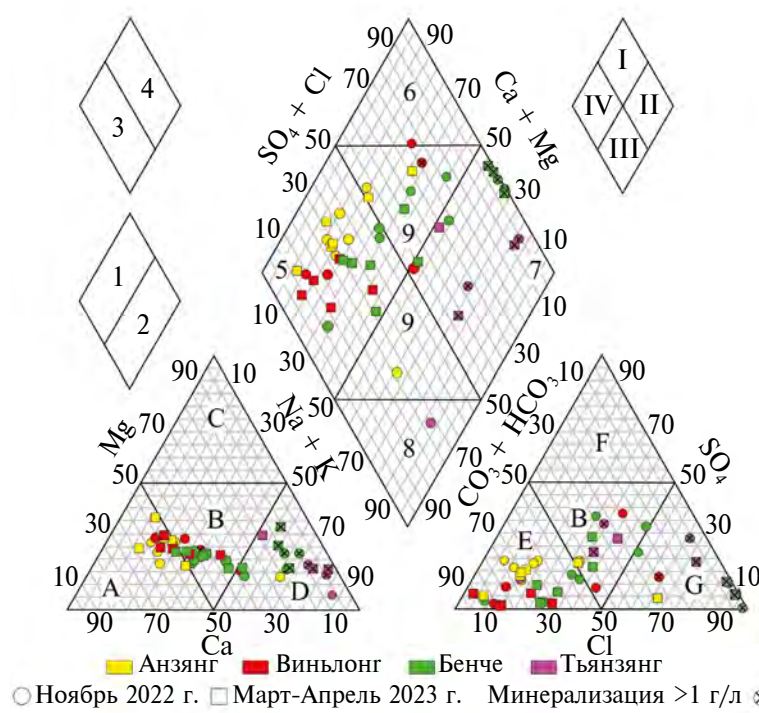
разнонаправленный транспорт воды и наносов [4]. Разнообразие условий формирования грунтовых вод дельты Меконга и факторов, влияющих на их функционирование, обуславливает различия в их химическом составе.

Согласно диаграмме Пайпера, грунтовые воды представлены всеми четырьмя основными гидрохимическими типами (рис. 2). Большинство образцов воды относятся к типу IV. Это пресные воды с преобладанием гидрокарбонатов и кальция. Встречаются грунтовые воды I типа с преобладанием хлоридов и кальция, а также III типа с доминированием гидрокарбонатов и натрия. Засоленные грунтовые воды приурочены к II типу.

За сухой сезон 2022–2023 гг. грунтовые воды с 8 ключевых участков изменили гидрохимический тип. В провинции Анзянг наиболее сильные изменения в ионном составе претерпели грунтовые воды с двух ключевых участков. В анионном составе первого образца доминирующие гидрокарбонаты сменились хлоридами. Катионный состав существенно не изменился. При этом тип грунтовой воды сменился с IV на I. Второй образец перешел из III типа в IV, что обусловлено в основном изменением в катионном составе, где преобладающий натрий сменился кальцием. При этом содержание кальция увеличилось на 10 мг/л (в 1.2 раза), а содержание натрия уменьшилось на 197 мг/л (в 11.5 раз).

В провинции Виньлонг смена I и II типов грунтовых вод на IV обусловлена в основном изменением в анионном составе. При этом значительная доля хлоридов сменяется на гидрокарбонаты. В 2023 г. абсолютно все образцы грунтовых вод были отнесены к IV типу. По катионному составу большинство образцов находятся на границе кальциевых и смешанных вод. Образцы воды ноября 2022 г. имеют более широкое распределение на треугольнике анионного состава по сравнению с образцами марта 2023 г., которые определяются как гидрокарбонатные.

Образцы грунтовых вод провинции Бенче имеют значительный разброс на диаграмме. Встречаются воды I, II и IV типов. В двух случаях произошла их смена. Первый образец, относящийся к грунтовым водам смешанного состава, изменил свой тип с I на II. При этом произошли уменьшение доли хлоридов и сульфатов и увеличение доли гидрокарбонатов. Второй образец изменил свой тип с II на IV — наиболее существенно снизилась доля хлоридов и возросла доля кальция в ионном составе. На катионном треугольнике пресные воды относятся в основном к смешанному типу, а засоленные — к натриевому. В анионном составе велика доля вод смешанного состава и гидрокарбонатных вод. Засоленные воды относятся к хлоридному типу, что обусловлено проникновением морской воды вглубь материка.



1. Щелочноземельные элементы превышают содержание щелочных
2. Щелочные элементы превышают содержание щелочноземельных
3. Слабые кислоты превышают содержание сильных кислот
4. Сильные кислоты превышают содержание слабых кислот
5. Карбонатная жесткость превышает 50%
6. Некарбонатная жесткость превышает 50%
7. Преобладают щелочи и сильные кислоты
8. Преобладают щелочноземельные элементы и слабые кислоты
9. Смешанный тип
- I. $\text{SO}_4\text{-Cl-Ca-Mg}$ тип
- II. $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$ тип
- III. $\text{HCO}_3\text{-Na}$ тип
- IV. $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ тип
- A. Кальциевый тип
- B. Нет доминирующего типа
- C. Магниевый тип
- D. Натриевый тип
- E. Бикарбонатный тип
- F. Сульфатный тип
- G. Хлоридный тип

Рис. 2. Гидрохимическая классификация грунтовых вод дельты р. Меконг.

Грунтовые воды провинции Тьянзянг относятся преимущественно к II типу. Это засоленные воды с преобладанием натрия и хлоридов. По катионному составу грунтовые воды группируются более плотно, по сравнению с анионным составом, где наблюдается достаточно широкое варьирование значений. Наиболее сильные изменения в химическом составе произошли на одном ключевом участке — гидрохимический тип сменился с III на II. В катионном составе произошло смещение в сторону смешанных вод, однако натрий остался преобладающим ионом. В анионном составе увеличилась доля хлоридов и сульфатов.

Таким образом, на территории дельты р. Меконг некоторые образцы грунтовых вод изменили гидрохимический тип: с I на II и IV, с II на IV, с III на II и IV, с IV на I (рис. 3а). Наиболее существенное изменение химического состава произошло в пресных грунтовых водах (см. рис. 3б). Исключение составляет один образец грунтовых вод провинции Виньлонг, где в ноябре 2022 г. фиксировалось значение сухого остатка 1370 мг/л. Однако в конце сухого сезона эта величина составила 780 мг/л. Засоленные грунтовые воды более “консервативны” — на исследуемых участках изменения их гидрохимического типа не произошло.

Изменение химического состава грунтовых вод может обуславливаться различными причинами, и одна из главных — хозяйственная деятельность человека. Во-первых, в сухой сезон недостаток осадков компенсируется орошением. Воду заби-

рают из естественных русел Меконга, каналов различной протяженности, прудов-накопителей дождевой воды, подземных вод. При этом химический состав оросительной воды имеет свою сезонную динамику и может значительно различаться.

Во-вторых, во Вьетнаме активно используются средства химической защиты растений и различного рода удобрения. В 2020 г. объем использованных удобрений составил 10.23 млн т, из них 7.6 млн т неорганических удобрений и 2.63 млн т органических удобрений, а также около 17 млн т органических удобрений, произведенных фермерами из побочных продуктов растениеводства и животноводства. Большинство (около 75%) производственных объектов сосредоточено в южном регионе страны [10, 11]. В 2019 г. список разрешенных к использованию в сельском хозяйстве химических препаратов насчитывал 4021 наименование, из которых 75% приходится на пестициды и фунгициды. Согласно отчету о сельскохозяйственном производстве в провинции Анзянг, на долю агрохимикатов приходится 48.9% от общей себестоимости риса [16, 17]. Таким образом активное применение химических средств в сельском хозяйстве может отразиться на химическом составе поверхностных и подземных водных объектов. Например, изменение гидрохимического типа грунтовых вод на ключевом участке в провинции Анзянг и увеличение содержания хлоридов могут быть обусловлены применением хорошо растворимых в воде хлорсодержащих калийных удобрений. При этом калий поглощается коллоидной частью

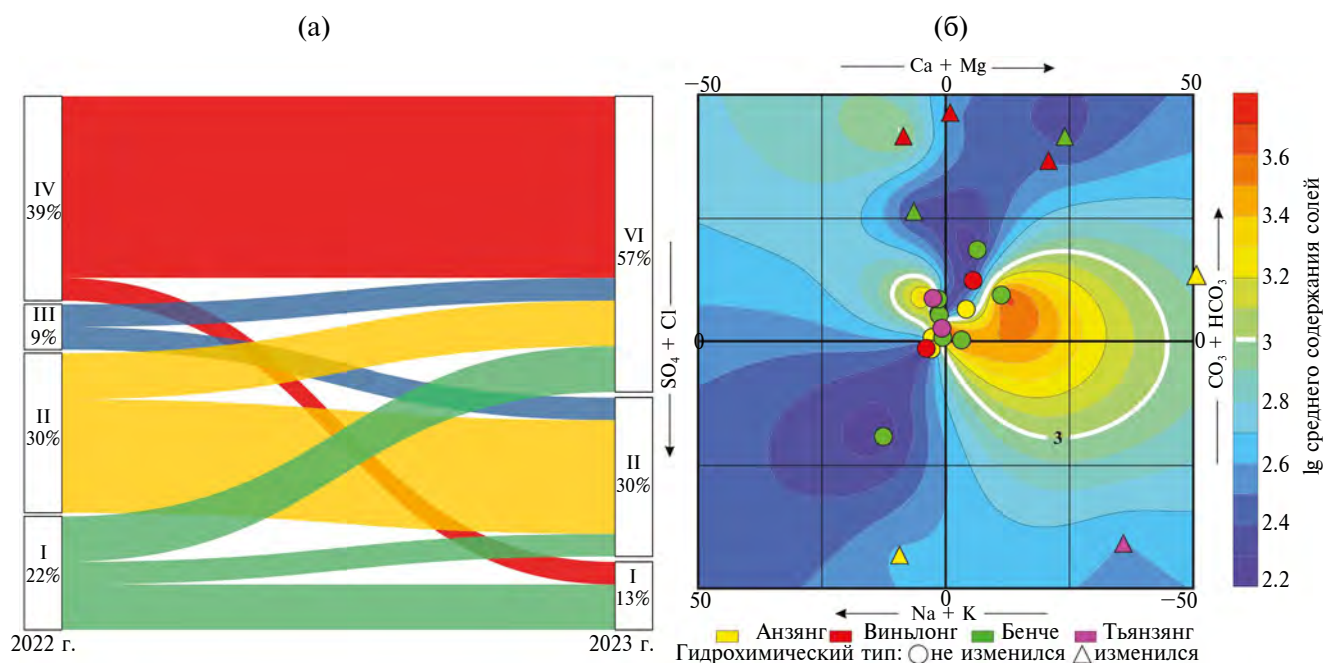


Рис. 3. Динамика химического состава грунтовых вод за сухой сезон 2022–2023 гг.: а — изменение гидрохимического типа; б — изменение соотношения основных ионов в %-экв.

почвы, а хлор остается в почвенном растворе и легко мигрирует в грунтовые воды. За сухой сезон соотношение $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\text{Cl}^-$ изменилось от 1.1 до 0.3, что говорит о доминировании иона хлора и может свидетельствовать об обмене Na^+ и K^+ с почвенно-поглощающим комплексом.

На территории дельты Меконга велико влияние интрузии морской воды, распространяющейся на десятки километров вглубь полуострова [17]. Грунтовые воды тесно связаны с поверхностными в связи с их неглубоким залеганием и густой канальной сетью, поэтому проникновение соленой воды во многом определяет их химический состав. Изменение гидрохимического типа грунтовых вод, обусловленное этим процессом, проявляется на границе с пресными водами, которая может изменяться год от года в связи с погодными условиями, ситуацией в верховьях реки, системой управления речным стоком в самой дельте. На ранних стадиях засоления/опреснения могут формироваться грунтовые воды $\text{Ca}-\text{Cl}$, $\text{Na}-\text{Mg}-\text{Cl}$, $\text{Na}-\text{HCO}_3$ типов [9]. На территории дельты р. Меконг, по данным [3], пик солености фиксировался в сухой сезон 2019–2020 гг., также отмечалась тенденция увеличения проникновения вглубь суши границы соленых вод.

Ярко выраженная сезонность климата также влияет на динамику химического состава грунтовых вод вследствие концентрирования путем испарения или разбавления атмосферными осадками. Движение воздушных масс над океанами и морями представляет значительный источник пополнения атмосферы растворимыми солями. Вблизи побережий ветер приносит соли водяных брызг, а наиболее высокодисперсные частицы воды поднимаются конвекционными токами на значительную высоту и переносятся воздушными течениями вглубь материка на большие расстояния [2]. По данным исследований, проведенных в северо-восточной части Вьетнама, химический состав атмосферных осадков определяется как преимущественно сульфатный кальциевый. Однако на участках, наиболее близких к морскому побережью, доля Na^+ и Cl^- также велика [18].

В работе [14] отмечается абсолютное доминирование Na^+ и Cl^- в составе выпадающих осадков. Таким образом, летом в условиях Восточноазиатского муссона атмосферные осадки могут влиять на химический состав грунтовых вод, в особенности пресных и слабоминерализованных. Так, например, изменение гидрохимического типа грунтовых вод с I и II на IV в провинции Виньлонг, где доминирующие хлориды сменились гидрокарбонатами, возможно связано со смешиванием грунтовых вод с атмосферными осадками во влажный сезон. В двух случаях из трех ключевые участки представляли собой непроизводимые земли (заброшенные огороды). Таким образом, можно предположить, что на изменение химиче-

ского состава грунтовых вод в большей степени оказали влияние природные факторы.

Важным фактором, определяющим химический состав грунтовых вод в дельте Меконга, является сброс промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод. Причем это приводит не только к смене гидрохимического типа, но и повышает риск возникновения заболеваний, связанных с превышением предельно допустимых концентраций [12, 13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории дельты р. Меконг грунтовые воды представлены всеми четырьмя основными гидрохимическими типами (согласно диаграмме Пайпера). Большинство образцов воды относятся к типу IV. Это пресные воды с преобладанием гидрокарбонатов и кальция. Встречаются грунтовые воды I типа с преобладанием хлоридов и кальция, а также III типа с доминированием гидрокарбонатов и натрия. Засоленные грунтовые воды приурочены к II типу.

За сухой сезон 2022–2023 гг. грунтовые воды с 8 ключевых участков изменили гидрохимический тип: с I на II и IV, с II на IV, с III на II и IV, с IV на I. Наиболее существенное изменение химического состава произошло в пресных грунтовых водах. Смена гидрохимического типа может обуславливаться использованием оросительной воды различного состава, применением средств химической защиты растений и удобрений, динамикой интрузии морских вод, атмосферными осадками, сбросом сточных вод.

Активное ведение хозяйства на территории дельты р. Меконг имеет своей глобальной целью обеспечение продовольственной безопасности страны. Однако следует учитывать возникающие при этом риски, в особенности связанные с эксплуатацией водных ресурсов региона.

Работа выполнена в рамках реализации НИР Эколан 3.7. “Теоретические основы управления водными ресурсами реки Меконг на основе динамической модели водного баланса, математического и геоинформационного моделирования процессов формирования и динамики грунтовых и поверхностных вод”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лам В.Х.К. Возраст и условия формирования вод верхне- и нижнеплиоценовых водоносных горизонтов дельты р. Меконг, по данным изотопно-геохимических исследований: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. Москва, 2022. 160 с.
2. Максимович Г.А. Химическая география вод суши. М.: Географиз, 1955. 328 с.
3. Ньунг Н.Т.Т. Текущее состояние солевой интрузии в дельте Меконга во Вьетнаме // Вестник НМС. 2020. № 19. С. 74–80.
DOI: 10.26897/2618-8732-2020-74-80

4. *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. М.: МГУ, 1999. 610 с.
5. ПНД Ф 14.1:2.3.99-97. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации гидрокарбонатов в пробах природных и сточных вод титриметрическим методом: утвержден 22.06.2017 / разработан ООО НПП Акватест. М.: ФГУ Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия, 2017. 25 с.
6. *Рогожина Н.Г.* Экологические и социальные проблемы дельты реки Меконг во Вьетнаме // Вьетнамские исследования. 2022. № 2(6). С. 37–45. <https://doi.org/10.54631/VS.2022.62-101585>.
7. ФР.1.31.2010.07463. МВИ массовой концентрации плотного, сухого и прокалённого остатка в сточных водах (и/или жидких отходах), в природных водах гравиметрическим методом. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293812/4293812502.htm>
8. *Чан Х.Т.* Эколого-гидрологические проблемы дельты реки Меконг // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. №1. С. 24–39. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-1-2>
9. *Bauer J., Börsig N., Pham V., Hoan T.V., Nguyen H., Stefan N.* Geochemistry and evolution of groundwater resources in the context of salinization and freshening in the southernmost Mekong Delta, Vietnam // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2022. V. 40. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101010>
10. *Cramb R.* The Evolution of Rice Farming in the Lower Mekong Basin // White Gold: The Commercialisation of Rice Farming in the Lower Mekong Basin. Palgrave Macmillan. 2020. P. 3–37. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0998-8_1
11. Department of Competition and Consumer Protection cooperated with the Japan International Cooperation Agency to conduct a competition report in the field of urea production and trading in Vietnam // Ministry of Industry and Trade (Vietnam): <https://moit.gov.vn/en>
12. *Giao N., Nhlen H., Phan A., Thupitmdang P.* Groundwater quality assessment for drinking purposes: a case study in the Mekong Delta // Vietnam. Scientific Reports. 2023. V.13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31621-9>
13. *Giao N., Phan A., Nhlen H.* Groundwater quality assessment using modified water quality index and associated human health risks in coastal regions of Vietnamese Mekong Delta // Arabian Journal of Geosciences. 2022. V. 15. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10906-9>
14. *Gobre T., Salve P.R., Krupadam R.J., Bansiwat A., Shastry S., Wate S.R.* Chemical Composition of Precipitation in the Coastal Environment of India // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2010. V. 85(1), 48–53. <https://doi.org/10.1007/s00128-010-0006-0>
15. Statistical yearbook of Viet Nam 2022 // General Statistics Office (GSO) of Viet Nam: <https://www.gso.gov.vn/en/data-and-statistics/2023/06/statistical-yearbook-of-2022/>
16. *Thanh P.L., Tran T.A.* Highly Hazardous Pesticides in Vietnam: A Situational Analysis. Report // Research Centre for Rural Development. 2020. P. 38.
17. *Tran D.A., Tsujimura M., Vo, L.P., Nguyen, V.T., Kambuku D., Dang T.D.* Hydrogeochemical characteristics of a multi-layered coastal aquifer system in the Mekong Delta, Vietnam // Environmental Geochemistry and Health. 2019. V. 42(2). P. 661–680. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00400-9>
18. *Viet P.H., Tuan V.V., Hoai P.M., Anh N.T.K., Yen P.T.* Chemical composition and acidity of precipitations: a monitoring program in northeastern Vietnam // Water, Air, and Soil Pollution, 2001. V. 130(1/4), P. 1499–1504. <https://doi.org/10.1023/a:1013989703593>

SEASONAL DYNAMICS OF GROUNDWATER CHEMICAL COMPOSITION IN THE MEKONG RIVER DELTA

**M. V. Bolgov^b, A. K. Kulik^b, N. T. Hiep^a, V. T. M. Chau^a, T. T. L. Thu^a, R. N. Balkushkin^{b,*},
A. A. Vypriitskiy^b, A. A. Vasilchenko^b**

^a*Southern Branch of Joint Vietnam–Russia Tropical Science and Technology Research Center,
3 st. 3/2, Dist. 10, Ho Chi Minh City, Vietnam*

^b*Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the RAS,
Universitetskaya pr. 97, Volgograd, 400062 Russia*

^{*}*E-mail: balkushkin_r@vfanc.ru*

The Mekong Delta is a large agricultural region of Vietnam, ensuring food security and supporting the country's export potential. The possibility of effective agriculture requires accurate information on the groundwater state and assessment of both natural and anthropogenic factors that determine its chemical composition. The objective of the study was to investigate the dynamics of groundwater chemistry in the Mekong Delta during the 2022–2023 dry season. In total, 23 water samples were collected from the first aquifer in four provinces in November 2022 (the beginning of the dry season) and 23 samples in March–April 2023 (the end of dry season). The groundwater samples were analyzed for the content of major ions. The results of the study revealed that during the 2022–2023 dry season, groundwater from 8 key sites changed its hydrochemical type: from I to II and IV, from II to IV, from III to II and IV, from IV to I (according to the Piper diagram). The most significant change in the chemical composition occurred in fresh groundwater. The change of hydrochemical type can be caused by the use of irrigation water of different composition, the use of chemical plant protection products and fertilizers on agricultural lands, the dynamics of seawater intrusion, precipitation and wastewater discharge.

Keywords: groundwater, Mekong Delta, ionic composition of water, hydrochemical types of water, seawater intrusion

REFERENCES

- Lam, V.H.K. [Age and formation conditions of water in the Upper and Lower Pliocene aquifers in the Mekong River delta by the data of isotope geochemical studies]. Cand. Sci. (Geol.-Min.) Diss., Moscow, 2022, 160 p. (in Russian)
- Maksimovich, G.A. [Chemical geography of terrestrial water]. Moscow, Geografiz Publ., 1955, 328 p. (in Russian)
- N'ung, N.T.T. [Current state of salt intrusion in the Mekong River delta in Vietnam]. *Vestnik NMS*, 2020, no. 19, pp. 74–80. DOI: 10.26897/2618-8732-2020-74-80 (in Russian)
- Perel'man, A.I., Kasimov, N.S. [Geochemistry of landscape]. Moscow, MSU Publ., 1999. 610 p. (in Russian)
- [PND F 14.1:2:3.99-97. Quantitative chemical analysis of water. Methodology for measuring the mass concentration of hydrocarbonates in samples of natural and waste water by the titrimetric method: approved on 22.06.2017 / developed by NPP Aquatest LLC]. Moscow, Federal Center for Analysis and Assessment of Technogenic Impact, 2017, 25 p. (in Russian)
- Rogozhina, N.G. [Environmental and social problems in the Mekong River Delta in Vietnam]. *Vietnamskie issledovaniya*, 2022, no. 2 (6), pp. 37–45. <https://doi.org/10.54631/VS.2022.62-101585>. (in Russian)
- [FR.1.31.2010.07463. MVI of mass concentration of dense, dry and calcined residue in wastewater (and/or liquid waste), in natural waters by the gravimetric method]. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293812/4293812502.htm> (in Russian)
- Chan, H.T. [Ecological and hydrological problems in the Mekong River Delta]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problem, tekhnologii, upravlenie*. 2019, no. 1, pp. 24–39. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-1-2> (in Russian)
- Bauer, J., Börsig, N., Pham, V., Hoan, T.V., Nguyen, H., Stefan, N. Geochemistry and evolution of groundwater resources in the context of salinization and freshening in the southernmost Mekong Delta, Vietnam. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, vol. 40. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101010>
- Cramb, R. The evolution of rice farming in the Lower Mekong Basin. In: *White gold: the commercialisation of rice farming in the Lower Mekong Basin*. Palgrave Macmillan, 2020, pp. 3–37. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0998-8_1
- Department of Competition and Consumer Protection cooperated with the Japan International Cooperation Agency to conduct a competition report in the field of urea production and trading in Vietnam. Ministry of Industry and Trade (Vietnam): <https://moit.gov.vn/en>
- Giao, N., Nhien, H., Phan, A., Thuptimrang, P. Groundwater quality assessment for drinking purposes: a case study in the Mekong Delta. *Vietnam. Scientific Reports*, 2023, vol. 13, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31621-9>
- Giao, N., Phan, A., Nhien, H. Groundwater quality assessment using modified water quality index and associated human health risks in coastal regions of Vietnamese Mekong Delta. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, vol. 15. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10906-9>
- Gobre, T., Salve, P.R., Krupadam, R.J., Bansiwale, A., Shastry, S., Wate, S.R. Chemical composition of precipitation in the coastal environment of India. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, vol. 85(1), 48–53. <https://doi.org/10.1007/s00128-010-0006-0>
- Statistical yearbook of Viet Nam 2022. In: General Statistics Office (GSO) of Viet Nam. <https://www.gso.gov.vn/en/data-and-statistics/2023/06/statistical-yearbook-of-2022/>
- Thanh, P.L., Tran, T.A. Highly hazardous pesticides in Vietnam: A situational analysis. Report. Research Centre for Rural Development, 2020, pp. 38.
- Tran, D.A., Tsujimura, M., Vo, L.P., Nguyen, V.T., Kambuku, D., Dang, T.D. Hydrogeochemical characteristics of a multi-layered coastal aquifer system in the Mekong Delta, Vietnam. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, vol. 42(2), pp. 661–680. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00400-9>
- Viet, P.H., Tuan, V.V., Hoai, P.M., Anh, N.T.K., Yen, P.T. Chemical composition and acidity of precipitations: a monitoring program in northeastern Vietnam. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, vol. 130(1/4), pp. 1499–1504. <https://doi.org/10.1023/a:1013989703593>

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 556.531

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ ВОД В ВЕРХНЕМ ТЕЧЕНИИ Р. КУБАНЬ

© 2025 г. Т. В. Реутова^{1,*}, Ф. Р. Дреева¹, Н. В. Реутова¹¹Кабардино-Балкарский научный центр РАН, ул. Балкарова 2, Нальчик, 360017 Россия

*E-mail: reuttat@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.08.2024 г.

После доработки 25.10.2024 г.

Принята к публикации 20.02.2025 г.

Проведено полномасштабное обследование водных объектов, различающихся по происхождению и условиям формирования, на территории верхнего течения р. Кубань и бассейне ее главного притока р. Теберда (90 пунктов наблюдения). Цели — определение типичных и атипичных уровней содержания широкого круга примесей в водах, выявление реальных источников поступления компонентов, их миграции, распределения и возможных ассоциаций. Концентрации главных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) и ионов микропримесей (F^- , Li^+ , Sr^{2+}) определяли методом капиллярного ионофореза, микроэлементов (Al, As, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn) — атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией. На основании анализа данных методами порядковой статистики установлены региональные повышенные, высокие и экстремально высокие концентрации и выявлено распределение соответствующих водных объектов на изучаемой территории с использованием ГИС. Пространственный анализ показал, что в большинстве случаев, но не всегда, они совпадают по местоположению с рудопоявлениями и шлейфами рассеяния (As, Mo), зонами современного вулканизма под западной вершиной Эльбруса (Al, Li, F, Mg, SO_4^{2-}), пиритизации (SO_4^{2-}), распространения осадочных карбонатных и гипсоносных пород (Ca, Mg, Sr, SO_4^{2-}). В большей части водных объектов (50–75%) концентрации почти всех компонентов ниже кларков речных вод. Они настолько обеднены эссенциальными элементами F, Ca, Mg, K, что не отвечают критериям физиологически полноценных вод. В некоторых водных объектах природное загрязнение As, Al и Li достигает опасного уровня, риски повышаются на фоне дефицита главных катионов.

Ключевые слова: природные воды, главные ионы, потенциально токсичные элементы, региональные уровни содержания/региональное распределение концентраций, р. Кубань, р. Теберда

DOI: 10.31857/S0869780925020048 EDN: EPUFTT

ВВЕДЕНИЕ

Кубань — главная река западной части Северного Кавказа, ее роль невозможно переоценить, и изучение химического состава вод Кубани и ее крупных притоков имеет важнейшее значение. Государственная служба наблюдений Росгидромета осуществляет контроль содержания загрязняющих веществ (ЗВ) в бассейне Кубани и ежегодно публикует обобщенные характеристики и оценки состояния качества вод в реке Кубани и устьях ее крупных притоков [5], включающие случаи превышения ПДК отдельными ЗВ и их частоту, комплексные показатели загрязненности с выделением характерных загрязнителей и распределение вод по классам качества согласно рекомендациям [12].

К сожалению, верхняя часть бассейна Кубани на регулярной основе не обследуется, верхний пункт наблюдений находится на участке Кара-чаевск—Черкесск. Этот участок на протяжении последних 5 лет характеризуется как наименее загрязненный, но отмечается устойчивое загрязнение $\text{Fe}_{\text{общ}}$ до 2–4 ПДК. Первый из обследованных притоков р. Большой Зеленчук впадает в Кубань в г. Невинномысск, хотя и выше по течению река принимает достаточно крупные притоки, самый значительный из которых — р. Теберда. Лишь одна группа исследователей [3, 10] периодически проводит определение 16 нормируемых компонентов химического состава вод на 9–11 створах по р. Кубань, начиная от 30-го км ее течения (выше г. Ка-

рачаевск 5 пунктов) до г. Черкесск, и на 5 створах по р. Теберда, первый из которых находится ниже пос. Домбай (6-й км от истока р. Аманауз), а последний — в устье. Воды оценивались 2–3 классами качества, на р. Кубань до впадения Теберды наблюдалось устойчивое загрязнение Fe, Mn, Cu, Zn, для р. Теберда характерно устойчивое загрязнение Fe (по всей длине), Mn (в верхних створах), неустойчивое Cu и единичное Zn. Авторы утверждают, что естественные “эколого-геологические” причины повышения концентраций тяжелых металлов отсутствуют, относят все случаи превышения ПДК исключительно к антропогенному воздействию, пос. Домбай в 5–6 км от истока считают основным загрязнителем Теберды. Однако химический состав поверхностных вод суши является результатом совокупного влияния природно-климатических условий, среди которых геологическое строение и минералогический состав горных пород, количество атмосферных осадков и подземная составляющая стока, тип почв на водосборе, эпизодические паводки и наводнения, и антропогенных факторов, включающих степень хозяйственного освоения, специфику человеческой деятельности, уровень антропогенной нагрузки, а иногда аварийные ситуации на предприятиях и очистных сооружениях [14]. Верхняя часть бассейна Кубани до г. Карачаевск малонаселенная, в настоящее время промышленные предприятия отсутствуют (действует одна лесопилка в пос. Учкулан). Техногенная нагрузка представлена хвостохранилищем бывшего Эльбрусского горно-обогатительного комбината и заброшенными штольнями с ничтожно малым стоком. Население занято в сельском хозяйстве, основой которого является отгонное и пастбищное животноводство, площади обрабатываемых земель незначительны. Расширенная часть долины Теберды более населена. В ее верхней части находится г. Теберда — один из старейших климатических курортов России, и обслуживающие его предприятия коммунального хозяйства, ниже расположено несколько поселков. В зоне истока реки находится популярный туристический и горнолыжный кластер Домбай с небольшой численностью постоянно проживающего населения и нерегулярной загруженностью, резко возрастающей в пиковые сезоны. Помимо сельскохозяйственного производства и обслуживания курорта работают небольшие предприятия по добыче стройматериалов (мрамор).

Водосборная площадь в верховьях горных рек, таких как Кубань и ее притоки первого и второго порядка, протекающие в высокогорной и среднегорной зоне, имеет сложное геологическое строение [1, 2]. Здесь представлены разнообразные горные породы: древние метаморфические, разновозрастные магматические интрузивы и эффузивы, осадочные, существуют многочисленные зоны тектонического дробления, а также месторождения и рудопроявления целого ряда элементов (Cu,

Pb, Zn, W, Mo, Au, As с аксессуарными элементами) и минеральные источники. Обширная речная сеть глубоко врезана в рельеф, и водоносные породы полностью ею дренируются [8], для зоны Главного и Передового хребта характерны трещинно-жильные воды коры выветривания и трещинно-грунтовые воды, а в нижележащей зоне распространены трещинные и трещинно-пластовые воды, приуроченные к разломам. На примере верховий притока Кубани р. Белой в пос. Гузерипль на границе Кавказского государственного природного биосферного заповедника, выше которого антропогенный фактор сведен к минимуму, при сопоставлении концентраций Cu и поступления в русло реки взвешенного и влекомого материала от обвалов и оползней показано, что стабильно высокие концентрации Cu (1.5–7 мкг/л) в воде притоков р. Кубань, вероятно, связаны с природными факторами, в первую очередь с почвами и горными породами. Эпизодически фиксируемые случаи экстремально высокого загрязнения воды соединениями Cu (превышающие ПДК в 50 раз и более) могут быть обусловлены попаданием в воду большого количества грунта с селевыми или оползневыми потоками [7].

Авторы [4] отмечают, что при эколого-гигиенической оценке водоемов за рамками остаются “сведения о других существенных источниках загрязнений” помимо антропогенных последствий. Аномально высокие фоновые концентрации Cu, Zn и Fe в верховьях Кубани, “поскольку эта часть реки наименее населена и не имеет крупных, а тем более “грязных” предприятий”, связывают с загрязнением атмосферных осадков и пылевым загрязнением ледников за счет дальнего переноса.

Все исследования, проводимые в верхней части бассейна Кубани (до г. Черкесск), узконаправлены и имеют целью санитарно-гигиеническую оценку русел главных рек по небольшому числу показателей, среди которых почти не представлены потенциально токсичные элементы. Они не отражают реальную гидрохимическую обстановку в этом уникальном по разнообразию условий формирования состава природных вод регионе, имеющем перспективы развития в качестве рекреационных территорий. Однако сведения о содержании широкого круга компонентов химического состава вод речной сети необходимы для решения как важных фундаментальных задач в области гидрохимии и геоэкологии, так и практических, связанных с поиском водных объектов, пригодных в качестве источников питьевого водоснабжения (централизованного и нецентрализованного), и их оценкой с точки зрения безопасности для здоровья и физиологической полноценности.

В связи с этим была поставлена цель на основании детального обследования водотоков в верхнем течении Кубани и бассейне ее главного притока

р. Теберда определить типичные и атипичные уровни содержания широкого круга примесей в водах, выявить реальные источники поступления различных компонентов, их миграцию и зональное распределение, взаимные связи и возможные ассоциации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходя из поставленных задач, с 2017 по 2023 г. были обследованы многочисленные водные объекты, различающиеся по происхождению и условиям формирования, в бассейне Кубани и Теберды, от истоков обеих основных рек до г. Черкесск, где проходит граница горной и равнинной части [8]. Наблюдения проводили в 87 пунктах/створах, 40 из которых представляли ледниковые и 47 неледниковые водные объекты. На начальном этапе (2017 г.) были выбраны створы на основных реках перед впадением крупных притоков, начиная от максимально приближенных к истокам (Кубань 6-й км, Теберда 4-й км), и в устьях многих притоков, как мощных ледниковых потоков, так и родниковых ручьев и малых рек неледникового происхождения. В дальнейшем (2018–2019 гг.) по такому же принципу были включены пункты в бассейнах притоков, имеющих собственную разветвленную речную сеть и приобретающих популярность в качестве рекреационных центров: Учкулан, Гоначхир, Уллухурзук. Последнему, водосбор которого занимает западный склон Эльбурского неовулканического центра, было уделено особое внимание. Пробоотбор проводили во время интенсивного таяния ледников при отсутствии атмосферных осадков в течение 5–6 дней, чтобы склоновый дождевой сток не искажал результаты.

Водосборы большей части обследованных рек занимают наиболее возвышенную область Западного Кавказа к северу от Главного хребта и к югу от Передового и включают наиболее высокий из основных хребтов Боковой и Центральную депрессию с абсолютными высотами в истоках рек до 3 тыс. м, в долинах более 1.5 тыс. м. Истоки нескольких рек, самая значительная из которых — Худес, и небольшие левые притоки Теберды ниже пос. Верхняя Теберда находятся на северных склонах Передового хребта на высотах ~2 тыс. м и стекают в Северо-Юрскую депрессию. Они занимают промежуточное положение между высокогорными и среднегорными реками. Оледенения в их истоках не наблюдается. Немногочисленные реки среднегорья (Джалонкол, Аминкол, Индыш, Мара) начинаются на южных склонах Скалистого хребта, лишь бассейн Джегуты относится к его северному склону и Меловой депрессии. Карта расположения пунктов наблюдений, представленная на рис. 1, составлена в программе QGIS 3.28 на основе полной базы данных по результатам обследования водных объектов.

Пробы отбирали согласно ГОСТ Р 59024-2020, фильтровали на месте отбора через мембранные фильтры с размером пор 0.45 мкм. Определение концентраций главных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) и ионов микропримесей (F^- , Li^+ , Sr^{2+}) проводили методом капиллярного ионофореза, микроэлементов (МЭ: Al, As, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn) — атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией, измеряли pH.

Из значений средних концентраций (в каждом пункте 3–6 проб за период наблюдений) были составлены ранжированные ряды и проведена элементарная статистическая обработка, выделены значения квартилей (Q_1 , Q_2 , Q_3) и интерквартильных диапазонов (IQR) для всего массива данных и дополнительно для ледниковых и неледниковых водных объектов. Также в общем массиве выявлены незначительные выбросы, когда концентрации выше Q_3 на 1.5 IQR, и значительные, отличающиеся от Q_3 на 3 IQR.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Значения выделенных диапазонов концентраций определяемых компонентов, характеризующих их распределение в водных объектах речной сети на территории верхнего течения Кубани, представлены в табл. 1 (главные ионы и ионы-микропримеси) и табл. 2 (потенциально токсичные элементы). Для сравнения в таблицах приведены величины кларков речной воды (K_r) и ПДК для питьевой воды и водоемов рыбохозяйственного назначения. При этом для диапазонов выбросов приведены не расчетные концентрации, а действительно существующие в вариационном ряду, попадающие в расчетный диапазон. Они отличаются от расчетных, иногда значительно. Пункты, в которых зарегистрированы экстремально высокие ($C_{\text{экс}}$ — значительные выбросы) и высокие ($C_{\text{выс}}$ — незначительные выбросы) концентрации, отмечены на рис. 1 химическими символами соответствующих компонентов. Концентрации в интервале “ Q_3 — незначительный выброс” рассматриваются как региональные повышенные ($C_{\text{пов}}$).

Межгодовая изменчивость концентраций компонентов ионного состава, в том числе микропримеси F^- , характеризуется для пунктов следующими значениями коэффициентов вариации: минимальные 0.003–0.02, в большинстве случаев составляют 0.20–0.35 и увеличиваются до 0.6–0.7 при низком содержании на уровне предела определения (ПО). Для МЭ, из которых концентрация многих находится на уровне ПО, они выше (0.5–0.8), но в пунктах с повышенным содержанием могут быть сравнимы с характерными для ионов, а для As составляли 0.02–0.16. Наибольшую межгодовую вариабельность наблюдали для Cu и Al.

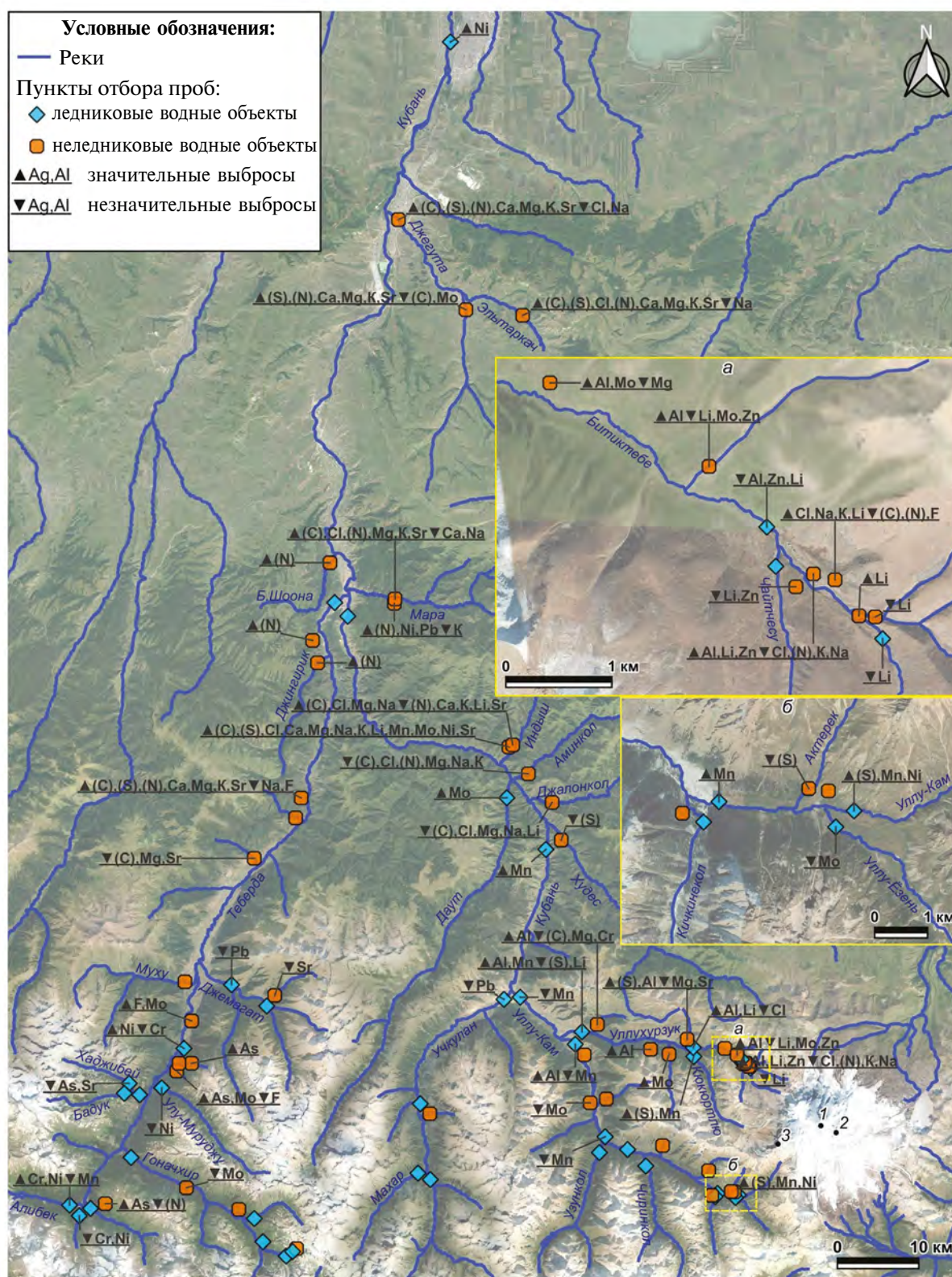


Рис. 1. Карта расположения пунктов наблюдений (отбора проб) и распределения высоких и экстремально высоких концентраций компонентов химического состава в водах: *а* — бассейн р. Битиктебе, *б* — бассейн р. Теберда. Вулканические постройки: вершины г. Эльбрус: 1 — западная, 2 — восточная; 3 — г. Кукуртли-Колбаши, высшая точка экструзивного массива Кюкуртли одновозрастного с извержениями вулкана Палео-Эльбрус; (C) — ион HCO_3^- ; (N) — ион NO_3^- ; (S) — ион SO_4^{2-} .

Таблица 1. Распределение концентраций компонентов ионного состава природных вод верхней части бассейна Кубани

Статистический показатель	Концентрации компонентов ионного состава										
	Главные и биогенные ионы (мг/л)								Микропримеси, (мкг/л)		
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Sr ²⁺	Li ⁺	F ⁻
C_{макс} В т.ч. в объектах:	70.1	29.8	41.7	9.7	358.7	96.6	21.0	17.6	882	159.7	405
ледниковых	20.4	7.4	11.8	2.2	69.0	84.4	6.57	1.9	97	49.9	218
неледниковых	70.1	29.8	41.7	9.7	358.7	96.6	21.0	17.6	882	159.7	405
C_{мин} [*]	1.6	0.3	0.5	0.1	5.8	0.7	0.3	<ПО (6)	≈ПО (26)	≈ПО (50)	≈ПО (5)
В т.ч. в объектах:											
ледниковых	2.4	0.3	0.5	0.3	5.8	1.1	0.24	<ПО (1)	<ПО (4)	<ПО (18)	3
неледниковых	1.6	0.4	4.1	0.1	14.2	0.7	0.32	<ПО (1)	<ПО (1)	<ПО (12)	5
C_{мед} В т.ч. в объектах:	9.8	2.3	1.9	1.0	41.4	6.7	1.1	0.7	28	1.5	110
ледниковых	5.5	1.0	1.2	0.7	20.2	5.8	0.73	0.6	10	0.25	89
неледниковых	15.4	4.2	4.1	1.5	6.2	10.9	1.48	1.1	45	1.6	134
IQR	<u>18.1</u> 5.8	<u>4.8</u> 0.9	<u>5.7</u> 1.2	<u>1.9</u> 0.7	<u>68.9</u> 20.1	<u>13.4</u> 4.5	<u>2.3</u> 0.6	<u>1.2</u> 0.4	<u>67</u> 11	<u>8.2</u> <ПО	<u>150</u> 70
В т.ч. в объектах:											
ледниковых	<u>7.6</u> 4.4	<u>2.2</u> 0.5	<u>2.1</u> 0.7	<u>1.0</u> 0.6	<u>32.6</u> 16.1	<u>8.0</u> 4.0	<u>1.2</u> 0.5	<u>0.7</u> 0.3	<u>20.5</u> 6.5	<u>3.8</u> <ПО	<u>121</u> 49
неледниковых	<u>26.6</u> 10.9	<u>11.3</u> 2.3	<u>9.7</u> 1.8	<u>0.3</u> 0.9	<u>144.4</u> 50.7	<u>19.7</u> 5.3	<u>3.0</u> 0.9	<u>2.9</u> 0.6	<u>117</u> 29	<u>12.8</u> 0.3	<u>194</u> 78.5
Выбросы:											
незначительные	<u>50.9</u> 49.1 (2)	<u>15.5</u> 11.3 (6)	<u>17.2</u> 13.4 (6)	<u>4.9</u> 4.1 (3)	<u>204.1</u> 151.2 (6)	<u>29.2</u> 28.0 (2)	<u>7.4</u> 5.5 (5)	<u>3.4</u> 2.5 (5)	<u>181</u> 142 (4)	<u>34.9</u> 20.2 (8)	<u>362</u> 291 (4)
значительные	≥61.8 (5)	≥16.8 (6)	≥20.6 (2)	≥5.4 (7)	≥217.8 (5)	≥39.9 (8)	≥10.6 (5)	≥5.4 (9)	≥251 (5)	≥41.9 (5)	≥405 (1)
Кларки речных вод	12	2.9	5	2	40	12	5.5	—	50	2.5	100
ПДК _{пит.}	100*	50*	—	12*	—	500	350	45	7000	30	1500
ПДК _{рыб.}	180	40	120	50* 10**	—	100	300	40	400	80	750

Примечание: *— согласно нормативам, принятым в ЕС; **— при минерализации до 100 мг/л. Здесь и в табл. 2 в скобках указано число пунктов наблюдений.

Таблица 2. Распределение концентраций потенциально токсичных элементов в природных водах верхней части бассейна Кубани

Статистический показатель	Концентрации потенциально токсичных элементов (мкг/л)								
	Al	As	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
C_{макс} В т.ч. в объектах:	1756.3	142.00	1.03	7.76	216.2	6.60	4.88	1.76	133.2
ледниковых	926.8	5.81	1.03	6.60	216.2	2.35	4.88	1.29	82.4
неледниковых	1756.3	142.00	0.99	7.76	7.66	6.60	3.71	1.76	133.2
C_{мин}	3.1	<ПО (3)	0.03	<ПО (4)	0.12	<ПО (20)	<ПО (10)	0.21	<ПО (5)
В т.ч. в объектах:									
ледниковых	3.3	0.23	0.06	<ПО (4)	0.12	<ПО (8)	<ПО (5)	0.21	<ПО (2)
неледниковых	3.1	<ПО (2)	0.03	0.07	0.27	<ПО (12)	<ПО (4)	0.06	<ПО (3)
C_{мед} В т.ч. в объектах:	52.1	1.41	0.33	1.96	2.24	0.29	0.54	0.67	29.5
ледниковых	79.9	1.47	0.34	2.48	3.69	0.20	0.65	0.68	29.5
неледниковых	32.2	1.31	0.35	1.73	1.61	0.32	0.45	0.66	35.2
IQR	<u>92.9</u> <u>16.1</u>	<u>2.9</u> <u>0.9</u>	<u>0.45</u> <u>0.27</u>	<u>4.24</u> <u>0.79</u>	<u>4.00</u> <u>1.30</u>	<u>0.50</u> <u>0.10</u>	<u>0.85</u> <u>0.21</u>	<u>0.79</u> <u>0.56</u>	<u>41.4</u> <u>20.7</u>
В т.ч. в объектах:									
ледниковых	<u>112.5</u> <u>32.4</u>	<u>2.39</u> <u>1.00</u>	<u>0.48</u> <u>0.27</u>	<u>4.48</u> <u>0.97</u>	<u>7.87</u> <u>2.19</u>	<u>0.39</u> <u>0.11</u>	<u>1.50</u> <u>0.25</u>	<u>0.77</u> <u>0.58</u>	<u>41.4</u> <u>20.1</u>
неледниковых	<u>62.5</u> <u>13.0</u>	<u>3.28</u> <u>2.46</u>	<u>0.44</u> <u>0.28</u>	<u>4.25</u> <u>0.80</u>	<u>2.41</u> <u>1.07</u>	<u>0.78</u> <u>0.04</u>	<u>0.73</u> <u>0.17</u>	<u>0.83</u> <u>0.55</u>	<u>45.4</u> <u>24.0</u>
Выбросы:									
незначительные	<u>243.7</u> <u>243.7</u> (1)	<u>9.0</u> <u>6.0</u> (0)	<u>0.79</u> <u>0.72</u> (4)	<u>14.6</u> <u>9.4</u> (0)	<u>13.4</u> <u>9.6</u> (4)	<u>1.56</u> <u>1.26</u> (5)	<u>2.47</u> <u>1.94</u> (2)	<u>1.29</u> <u>1.17</u> (3)	<u>82.4</u> <u>73.7</u> (3)
значительные	≥388.7 (9)	≥25.9 (3)	≥0.99 (2)	≥14.6 (0)	≥23.9 (6)	≥1.96 (6)	≥3.13 (5)	≥1.76 (1)	≥133.2 (1)
Кларки речных вод	160	2	1	7	10	1	2.5	1	20
ПДК _{пит.}	200	10	50	1000	100	250	20	10	1000
ПДК _{рыб.}	40	50	20	1	10	1	10	6	10

Территория исследования — регион гидродинамических и гидрохимических аномалий, обусловленных сложными тектоническими условиями, глубокой эрозией изрезанностью поверхности, где наряду с субгоризонтальными региональными потоками подземных вод имеются зоны субвертикальных межпластовых перетоков [1], а также контрастным распределением атмосферных осадков и наличием ледников. Речные воды отличаются

большим разнообразием химического состава, что подтверждается полученными данными: широким варьированием концентраций практически каждого компонента и их соотношений, в том числе в близко расположенных водных объектах разного генезиса.

Большинство вод имеют нейтральную реакцию (pH 6.5–7.5), некоторые из них являются слабо-

щелочными (величины рН в табл. 1 и 2 не приведены). Переход от нейтральных к слабощелочным водам наблюдается в неледниковых реках, формирующихся на Передовом хребте и ниже, начиная от правобережной зоны бассейна р. Уллухурзук и к северу от Тебердинской котловины до р. Дзегута. Максимальное разовое значение рН составило 8.4, минимальное — 6.3.

Минерализация была рассчитана по сумме ионов. Для большей части исследуемой территории характерны воды очень малой и малой минерализации согласно классификации О.А. Алекина [9]. Воды всех ледниковых рек относятся к очень маломинерализованным (<0.1 г/л). Исключение составляли реки, формирующиеся непосредственно на склонах Эльбруса, а именно: р. Уллухурзук и ее истоки — Битиктебе и Кюкюртлю, а также р. Кубань/Уллу-Кам в створе 6-й км. Здесь минерализация составила 0.12–0.16 г/л, что соответствует водам малой минерализации. Минерализация вод родников, неледниковых ручьев и малых рек изменяется в широких пределах и прослеживается ее зависимость от высотного положения водного объекта. Наименьшие значения суммы ионов (до 0.1 г/л), сравнимые с минерализацией ледниковых рек, относятся к высокогорной зоне. В среднегорной зоне минерализация закономерно повышается, и воды рек, стекающих с северного и южного склонов Скалистого хребта, среднеминерализованные. Однако в трех правых притоках р. Битиктебе под южным склоном Передового хребта воды тоже относились к среднеминерализованным. Количество водных объектов со средним содержанием солей (0.2–0.5 г/л) составило 14% от общего числа.

Гидрокарбонат-ион (HCO_3^-) доминировал над остальными компонентами как в массовых концентрациях, так и в большинстве случаев в относительном ионном составе. При значительных отличиях водных объектов $S_{\text{мед}}$ совпадает с K_p . Вследствие широкого диапазона варьирования при относительно небольшом IQR многие концентрации были квалифицированы как выбросы. Почти все они относились к неледниковым рекам, водосбор которых находится на склонах Скалистого хребта, где распространены карбонатные породы, но в двух случаях относительно высокие концентрации (но в пределах IQR) были отмечены в правых притоках р. Битиктебе, т.е. под южным склоном Передового хребта.

Содержание HCO_3^- в ледниковых реках ниже медианы за исключением нижнего створа на Кубани (150-й км) и устья р. Битиктебе. В последнем повышении концентрации вызвано углекислыми источниками (лечебная местность Джылысу Западный). Относительный ионный состав вод на территории исследования характеризуется абсолютным преобладанием HCO_3^- (75–94%-экв

анионов) примерно в 40 пунктах наблюдений, представляющих неледниковые водные объекты разных высотных зон с разным уровнем содержания HCO_3^- , и 5 на ледниковых реках (4 левых притока Кубани в высокогорной зоне и вышеупомянутая р. Битиктебе, правый приток 2-го порядка). В анионном составе большинства ледниковых рек доля HCO_3^- составляла 50–75%-экв. Менее 50%-экв HCO_3^- содержалось в истоках Теберды и Кубани. Понижение доли ионов HCO_3^- не всегда связано с уменьшением их абсолютных концентраций. Так, во всех трех пунктах в бассейне р. Дзегута при $S_{\text{выс}}$ и $S_{\text{экс}}$ относительное содержание HCO_3^- составило 63–66%-экв анионов, как в большинстве ледниковых рек с низкими концентрациями HCO_3^- .

Сульфат-ион (SO_4^{2-}). В основном содержание сульфатов в водах невысокое, $S_{\text{мед}}$ вдвое ниже K_p , примерно на его уровне концентрация Q_3 . Водные объекты с $S_{\text{пов}}$, $S_{\text{выс}}$ и $S_{\text{экс}}$, как показано на рис. 1, сосредоточены на небольшом участке в правобережье Кубани. Это неледниковые реки: Дзегута с притоком, Худес с северного склона Передового хребта и ручей с его южного склона — правый приток р. Битиктебе. Кроме того, $S_{\text{экс}}$ порядка 60–80 мг/л обнаружены в ледниковых реках Кюкюртлю и Уллу-Кам (6-й км). В этих реках SO_4^{2-} абсолютно доминирует в анионном составе (75–80%-экв). Обе реки берут начало на оставшемся от вулкана Палео-Эльбрус экструзивном массиве Кюкюртлю, в изверженных породах которого представлена элементная сера. Ее ориентировочные запасы составляют 25 тыс. т, а содержание в цементе лавобрекчий — до 14% [1]. Далее загрязнение за счет окисления серы прослеживается до устья р. Уллухурзук (52%-экв анионов), принимающей воды Кюкюртлю, и створа на 8-м км Кубани (60%-экв). В нескольких правых притоках Уллу-Кама, впадающих в 7–24 км от истока (30–45%-экв), отмечались $S_{\text{пов}}$ и $S_{\text{выс}}$. Источники SO_4^{2-} в бассейне Дзегуты — гипсоносные осадочные породы, распространенные в зоне Скалистого и Пастбищного хребта, а в р. Худес и притоке р. Битиктебе — пиритизированные породы, связанные с рудными полями минерогенической зоны Передового хребта [1]. Очень малые концентрации SO_4^{2-} 1–4 мг/л характерны для ледниковых и неледниковых водотоков в зоне истоков основных рек.

Хлорид-ион (Cl^-). Воды высокогорных рек региона отличаются низким и очень низким содержанием Cl^- . Особенно обеднены Cl^- воды в бассейне Теберды, его наибольшая концентрация в роднике в нижней части бассейна составила 3.2 мг/л, в остальных водных объектах содержалось <2 мг/л. Концентрации, достигшие и несколько превысившие K_p , на общем фоне считаются $S_{\text{выс}}$, а 10–20 мг/л расцениваются как $S_{\text{экс}}$. Водные объекты с таким содержанием Cl^- образовали две группы (см. рис. 1). В одну входят 5 среднегорных

рек, истоки 4-х из них (Мара, Индыш, Аминкол, Джаланкол) на Скалистом хребте, бассейн еще одной (р. Джегута) занимает его северные склоны и котловину в Меловой депрессии. Все они находятся в зоне куэст на водоразделе Азово-Черноморского и Каспийского бассейнов и имеют смежные водосборные площади. Другая группа занимает весь бассейн ледниковой р. Битиктебе. Здесь, как в неледниковых ручьях и родниках, так и самой реке вплоть до устья, принимающей р. Уллухурзук, зарегистрированы $S_{\text{макс}}$, несколько $S_{\text{выс}}$ и целый ряд $S_{\text{пов}}$. Повышенное содержание Cl^- в этом случае связано с влиянием молодого вулкана Эльбрус, поскольку на южном и северном его склонах наблюдалось еще более выраженное обогащение вод Cl^- [13].

Фтор-ион (F^-). Среднемировой уровень содержания F^- в речных водах низкий (0.1 мг/л) и не обеспечивает норм потребления этого микроэлемента. Критерию физиологической полноценности соответствуют концентрации 0.5–1.2 мг/л [11]. В районе исследования нижняя граница IQR в 1.5 раза ниже, а верхняя в 1.5 раза выше K_p , т.е. весь регион испытывает дефицит фтора, но подавляющее большинство измеренных концентраций находится в пределах 0.04–0.30 мг/л, типичных для вод рек, пресных озер и артезианских [9]. В лучшем случае его концентрации в нескольких водных объектах составляли 50–80% от нижней границы рекомендованных. Это родник в труднодоступном месте в бассейне Битиктебе и 3 родниковых ручья в бассейне Теберды рядом с автотрассой. Они показаны на рис. 1, поскольку для региона входят в группу выбросов. Два из них активно используются населением, но самый верхний загрязнен As.

Кальций-ион (Ca^{2+}). Большинство водных объектов обеднены Ca^{2+} . Принятый уровень его содержания для физиологически полноценных вод составляет 25–130 мг/л [11], ему соответствует всего 16% от общего числа изученных водных объектов, $S_{\text{макс}}$ попадает в центральную часть этого диапазона. Из них в высокогорье находится 3 водотока, 2 — в ущелье Уллу-Хурзук в малодоступных местах и 1 — ниже г. Теберда. Остальные — это реки среднегорной зоны. Таким образом, население высокогорной зоны испытывает крайний дефицит Ca^{2+} . В родниках, которые в некоторых местах являются единственным источником питьевой воды, содержалось в основном 10–15 мг/л Ca^{2+} , максимум 20 мг/л, минимально 1.5–3.0 мг/л.

Магний-ион (Mg^{2+}). Уровень содержания Mg^{2+} в водных объектах на территории исследования также понижен. Кларку, который совпадает с нижней границей концентраций для физиологически полноценных вод (5–50 мг/л) [11], соответствует значение Q_3 . Все $S_{\text{пов}}$ (5–8 мг/л) и часть $S_{\text{выс}}$ относились к водотокам в правобережье Кубани с 6-го (р. Актерек) по 50-й км (р. Худес), и в большинстве

они были сосредоточены в бассейне р. Уллухурзук. Их источником являются, по-видимому, молодые изверженные породы. Остальные водные объекты с $S_{\text{выс}}$ и $S_{\text{экс}}$ являются правыми притоками Кубани в среднегорной зоне, и во всех концентрации Cl^- и HCO_3^- также расцениваются как выбросы. Воды в бассейне Теберды, большая часть территории которого сложена древними кристаллическими породами, содержат Mg^{2+} в крайне низких концентрациях, из 32 пунктов наблюдений в 17 концентрации ниже Q_1 , 8 входят в IQR, но значения ниже $S_{\text{мел}}$ и в 5 — выше $S_{\text{мел}}$. Только в 2 водных объектах в нижнем течении реки отмечены $S_{\text{выс}}$ и $S_{\text{экс}}$.

Натрий-ион (Na^+). Как и в случае сульфат- и хлорид-ионов, почти все измеренные значения Na^+ выше K_p расцениваются на общем фоне как $S_{\text{пов}}$. В группе значительных выбросов 2 водных объекта. При этом $S_{\text{макс}}$, вдвое выше следующего по ранжиру, неожиданно относился к самому высокогорному роднику-водоводу в бассейне р. Битиктебе. Пространственное распределение Na^+ во многом схоже с распределением Mg^{2+} . Также выделяется бассейн р. Уллухурзук и те же несколько среднегорных рек, являющихся правыми притоками Кубани. Крайне обеднены Na^+ воды в бассейне Теберды. В половине водных объектов концентрации были ниже Q_1 , остальные входят в IQR.

Калий-ион (K^+). По сравнению с среднемировым уровнем содержание K^+ в водах столь же низкое, как и Na^+ . Нижняя граница $S_{\text{пов}}$ находится на уровне K_p , и только воды в диапазоне Q_3 – $S_{\text{макс}}$ соответствуют нормам физиологически полноценных вод (2–20 мг/л) [11]. Среди родников, используемых для питья, этому критерию удовлетворяли 4 водовода на территории Джылысу Западный и 1 в низовьях Теберды. В остальных концентрации составляли 0.1–1.4 мг/л. Диапазоны содержания SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , Na^+ , иногда Ca^{2+} и NO_3^- , в которые попадают конкретные водные объекты, как правило, те же или выше тех, в которые они попадают по содержанию K^+ . Таким образом, в пространственном распределении K^+ прослеживаются аналогии с вышеперечисленными ионами при минимальном вкладе K^+ в ионный состав 2–5.5%-экв катионов.

В относительном катионном составе доминирует Ca^{2+} , что соответствует типичным маломинерализованным водам [9]. В большинстве водных объектов ($n = 60$) на его долю приходилось 50–75%-экв катионов при широком варьировании абсолютных концентраций от 2–4 до 60–70 мг/л. Более 75%-экв Ca^{2+} содержали воды 9 объектов, расположенных в верхней части бассейна Теберды ($n = 7$), и двух притоках р. Уллу-Кам, но абсолютные концентрации в этой группе совпадали с IQR. Для части водотоков доля Ca^{2+} составила менее половины суммы эквивалентов катионов ($n = 20$), причем в 5 из них вклад Ca^{2+} был менее 25%-экв,

а содержание Ca^{2+} в них могло быть как низким, так и высоким. Кальций оставался доминирующим ионом по массовой концентрации до его относительного содержания 40%-экв. За исключением нескольких среднегорных рек, притоков Теберды и Кубани до их слияния, все пункты, где вклад Ca^{2+} в эквивалентный ионный состав был менее 50%, находились в бассейне р. Битиктебе, включая результирующий створ в устье р. Уллухурзук. В среднегорных реках основным конкурентом Ca^{2+} является Mg^{2+} , а в родниковых ручьях непосредственно в долине р. Битиктебе и в самой реке максимальный вклад вносил Na^+ . Его доля составляла 40–55%-экв, а доля Ca^{2+} всего 17–24%-экв при том, что суммы ионов составляли 0.07–0.16 г/л (макс. 0.41 г/л).

Стронций-ион (Sr^{2+}). Потенциально токсичный Sr^{2+} не являлся характерной примесью в поверхностных водах. Во всех ледниковых реках, включая Теберду на всем протяжении и Кубань с 8-го по 55-й км, эти ионы или не были обнаружены, или появлялись спорадически. То же наблюдалось в некоторых неледниковых водотоках в зоне истоков основных рек. Значение Q_1 совпадает с ПО, $C_{\text{мед}}$ равняется 3 ПО, т.е. в значимых концентрациях Sr^{2+} содержится в половине пунктов наблюдения. Концентрации Sr^{2+} выше $C_{\text{мед}}$ на ледниковых реках наблюдались всего в 5 створах. Содержание в водах р. Кюкюртлю, устье Битиктебе и Кубани в г. Карачаевск не выходило за пределы IQR. На Кубани в створах 6-й и 150-й км отмечены $C_{\text{пов}}$ (0.08–0.10 мг/л), и это было связано с увеличением концентраций SO_4^{2-} до $C_{\text{пов}}$ в нижнем створе и $C_{\text{экс}}$ в верхнем. Примерно треть из обследованных водных объектов содержала Sr^{2+} в концентрациях выше K_p ($C_{\text{пов}}$ соответствует 1.4–2.4 K_p ; $C_{\text{выс}}$ — 3–3.5 K_p). В группе с $C_{\text{экс}}$, в которую входили 2 правых притока Кубани и водовод в низовье Теберды, формирующиеся на склонах Скалистого хребта, значения широко варьировали от 5 K_p (р. Мара) до 17 K_p в бассейне Джегуты. Воды этой реки от верхнего створа до устья, а также ее основного притока (р. Эльтаркач), не удовлетворяли критерию ПДК_{рыб}, превышая его до 2.2 раз. Токсичность Sr^{2+} определяется не только его концентрацией, но и соотношением Ca/Sr , значение этого показателя не должно быть ниже 100 [6]. На территории наблюдений отношение Ca/Sr от 70 до 100 наблюдалось в тех же трех пунктах в бассейне р. Джегута, причем концентрации Ca^{2+} в них были максимальными. Наименьшее значение этого отношения, связанное с низким содержанием Ca^{2+} , равнялось 110 (2.9 мг/л Ca^{2+}), а в других водных объектах с $C_{\text{выс}}$, отмеченных на рис. 1, оно составляло 125–320.

Литий-ион обычно содержится в пресных водах суши в очень низких концентрациях. Для Li^+ K_p ниже, чем для Cu , Mn , Zn (см. табл. 1). На изучаемой

территории в 2/3 водных объектов концентрации Li^+ не достигли K_p . В абсолютном большинстве из них Li^+ не был обнаружен или зарегистрирован спорадически. Медиана совпадала с ПО. В бассейне Теберды к ним относились все водные объекты за исключением трех левых притоков в нижнем течении, но ни в одном концентрации не могли считаться повышенными. На Кубани до впадения р. Уллухурзук и в бассейне р. Учкулан Li^+ не являлся постоянной примесью ни в одном водном объекте. Исключение составили 2 верхних створа (13.7 и 3.8 мкг/л в створах 6-ой и 8-ой км) и правый приток между ними (12.2 мкг/л). Ниже устья р. Уллухурзук, содержащей 20.2 мкг/л Li^+ , до нижнего створа концентрации Li^+ в воде Кубани составляли 3–4.5 мкг/л. В относительно небольшой группе значимых концентраций (>2 ПО) содержание Li^+ начинает быстро возрастать от 1–2 K_p в верхней части диапазона IQR к $C_{\text{пов}}$ (4–7 K_p), $C_{\text{выс}}$ (8–14 K_p) и $C_{\text{экс}}$ (17–20 K_p). Все водотоки, формирующиеся под западной вершиной Эльбруса, включая ледниковые реки с большим расходом воды, содержали более 5 K_p Li^+ . В части из них, а именно: во всех питьевых родниках в бассейне р. Битиктебе и трех створах на этой реке, была превышена ПДК_{пит} от 1.2–1.7 до 5–6 раз. Абсолютный максимум — единичное значение 2023 г., равное 192 мкг/л (77 K_p) — зарегистрирован в одном из питьевых водоводов в долине р. Битиктебе. Кроме того, воды с 5 K_p и более относились к правым притокам Кубани в среднегорной зоне от р. Джалонкол до рек Мара и Эльтаркач (приток 2-го порядка). Безусловно, повышение концентраций Li^+ в поверхностных водах отражает влияние вулканизма, прежде всего неовулканического Эльбурского центра в бассейне р. Битиктебе и истоке Кубани. Другие реки Мара, Индыш, Джалонкол имеют на водосборе более древние вулканические постройки [1].

Потенциально токсичные элементы в природных водах верхней части бассейна Кубани

Почти в 60% пунктов наблюдений превышена ПДК_{рыб}, но по сравнению со среднемировым уровнем содержания алюминия (Al) обогащенными этим элементом можно признать всего 14% от общего числа, и примерно в 11% водотоков концентрации превысили ПДК_{пит}. Они составляют диапазон $C_{\text{выс}}$ – $C_{\text{экс}}$ (см. табл. 2). Как показал пространственный анализ (см. рис. 1), эти водные объекты расположены на ограниченной площади, большинство находится в бассейне р. Уллухурзук. Из 17 пунктов наблюдений в бассейне этой реки 9 попадают в диапазон $C_{\text{выс}}$ – $C_{\text{экс}}$ и превышают ПДК_{пит} от 2 до 8.5 раз, и некоторые водотоки используются для питья. Преимущественно это водотоки в правобережной зоне р. Битиктебе (правая составляющая р. Уллухурзук). Больше на территории исследования за исключением створа 21-й км на Кубани ($C_{\text{пов}}$ 187 мкг/л) концентрации Al не достигали K_p .

В остальных пунктах наблюдений в бассейне р. Уллухурзук концентрации находились в пределах IQR и ниже. Вне бассейна р. Уллухурзук, находящегося на территории, сложенной изверженными породами четвертичного возраста под западной вершиной Эльбруса, где в наибольшей степени AI были загрязнены водные объекты подземного происхождения, более высокие концентрации были характерны для ледниковых рек. Для них IQR составил 52–95 мкг/л, а для неледниковых водотоков 8–46 мкг/л. Повышение содержания AI в водах региона вероятно связано с его выщелачиванием маломинерализованными агрессивными водами из первичной коры выветривания горных пород, преимущественно разновозрастных магматических [15].

Мышьяк. В общем уровень содержания токсичного As на территории наблюдений невысокий (см. табл. 2). Около 2/3 водных объектов содержали его в концентрации ниже K_p , в нескольких As не был обнаружен. Зарегистрировано 3 объекта с $C_{экс}$, превышающими ПДК_{пит}. Все они расположены в правобережье р. Теберды в ее верхнем течении (см. рис. 1). Самый верхний пункт — это ручей на склоне г. Мусат-Чери, где находятся канатные дороги курорта Домбай (2.5 ПДК_{пит}). Проба была отобрана на высоте 2.3 тыс. м н. у. м., исток расположен еще выше. Вода используется в качестве питьевой в многочисленных кафе и гостиницах вокруг станций канатных дорог. Вероятно, $C_{экс}$ связана с пунктом мышьяковой минерализации, обнаруженным в районе одноименного хребта (водораздел рек Домбай-Ульген и Гоначхир) [1], который она завершает. Ниже впадения в Теберду р. Гоначхир в районе р. Улу-Муруджу находится зона лито-геохимической аномалии по As, она представлена обширным ореолом вторичного рассеяния, пунктами мышьяковой и золотомышьяковой (до 5.7% As) минерализации [1]. Здесь в двух водотоках были обнаружены $C_{экс}$, достигшие 3.1 ПДК_{пит} в р. Шумка и 14.1 ПДК_{пит} в питьевом водоводе между реками Улу-Муруджу и Шумка, популярном у местного населения и туристов. Кроме того, $C_{пов}$ (2–2.5 K_p) отмечались и в многоводной ледниковой р. Улу-Муруджу к югу от вышеотмеченных пунктов, оз. Каракель и питающем его ручье, протекающем к северу от аномальной зоны. В левобережной части бассейна Теберды в верховьях р. Хаджибей также существуют проявления и пункт минерализации мышьяка, и в этой реке выявлено до 3 K_p As в верховье и 2 K_p в устье. Проявилась гидрохимическая аномалия по содержанию As в водотоках под западной вершиной Эльбруса в бассейне ледниковой р. Битиктебе. Во всех трех створах на самой реке и в ее притоках подземного происхождения отмечено 2–2.5 K_p , что соответствует $C_{пов}$. Согласно геологической карте [2], в этой зоне проявлений As не зарегистрировано.

Медь. Все исследователи отмечают медь как характерный или устойчивый загрязнитель вод Кубани. Действительно, если сравнивать найденное в наших исследованиях содержание Cu с крайне жестким ПДК_{рыб}, то почти 70% водных объектов на изучаемой территории следует признать загрязненными этим элементом (см. табл. 2). При этом величина K_p была превышена в единственном пункте — среднегорной р. Большая Шоона. Для верхней части бассейна Кубани $C_{пов}$ можно считать 4 мкг/л и выше, зарегистрированные в р. Кубань на 8-ом и 21-ом км от истока, ее притоках на том же отрезке и нижних створах на Кубани (55-й и 150-й км). В бассейне Теберды $C_{пов}$ отмечены в р. Гоначхир, начиная от истока р. Северный Клухор в 1.5 км от ледника. Постоянное население и активная хозяйственная деятельность здесь отсутствует, но для всего изучаемого региона характерно Cu–Zn и полиметаллическое оруденение [1, 2]. Особенно выделяется субширотная полоса от р. Учкулан до отрогов Эльбруса к истоку р. Малка, где на территории бассейнов рек Учкулан, Даут, Худес имеются месторождения, несколько десятков проявлений и пунктов минерализации меди [1]. Многочисленные рудопроявления и ореолы рассеяния Cu привели к тому, что ее пространственное распределение относительно однородно по сравнению с другими элементами, коэффициент вариации по территории был равен 0.8, в то время как, например, для Mn и As приближался к 4. Концентрации ни в одном пункте наблюдений не достигли уровня $C_{выс}$, т.е. не являются выбросами, а содержание Cu 1–4 мкг/л отражает региональный геохимический фон.

Цинк. Почти весь район исследования относится к минерагеническим зонам Главного и Переводового хребтов с широким развитием цинковых руд. Также Zn сопровождает медное и свинцовое оруденение [1, 2]. Естественно, что речные воды обогащены цинком. Значение Q_1 находится на уровне K_p , а $C_{пов}$ и $C_{выс}$ составляют 2–4 K_p . Почти в 90% обследованных водных объектов отмечается превышение ПДК_{рыб}. Тем не менее влияние рудоносности на содержание Zn в поверхностных водах неоднозначно. Так, на общем повышенном фоне выделяется узкая зона под западной вершиной Эльбруса вдоль долины р. Битиктебе, в водных объектах которой зарегистрирован единственный случай $C_{экс}$, 3 случая $C_{выс}$ и 2 — $C_{пов}$ (см. рис. 1). Здесь геохимических проявлений Zn не отмечалось. В бассейне Теберды в неледниковых водных объектах в ущелье р. Гоначхир и р. Домбай-Ульген, а также в бассейне Кубани в реках Даут, Джалонкол и верхнем створе на р. Джегута наблюдались $C_{пов}$ до 3 K_p , возможно, связанные с наличием оруденений в виде пунктов минерализации и шлиховых потоков Zn. В то же время в р. Худес, весь бассейн которой занимает обширное рудное поле Cu–Zn и Pb–Zn специализации, включая одно

разведанное и одно отработанное месторождение, концентрация Zn находится в пределах IQR. К сожалению, на реке имелся только 1 пункт наблюдений в устьевой зоне.

Свинец. Как уже упоминалось, на изучаемой территории находится множество Pb–Zn месторождений, проявлений и пунктов минерализации, но в отличие от Zn концентрации Pb на всей территории низкие и отличаются однородным пространственным распределением (коэффициент вариации — 0.36). Единственная $C_{\text{экс}}$ для региона не достигает 1.8 мкг/л, диапазон $C_{\text{пов}}$ фактически находится на уровне K_p , а $C_{\text{мин}}$ составила 0.2 K_p . Это может быть связано с низкой миграционной способностью свинца.

Молибден. Общий уровень концентраций Mo, как и Pb, низкий. Водные объекты с концентрациями ниже ПО составили 20%, величину K_p , совпадающую с ПДК_{рыб}, превышают только немногие концентрации, признанные выбросами (см. табл. 2). Концентрации в диапазоне $C_{\text{выс}}$ мало отличаются друг от друга и от K_p , составляя 1.3–1.6 K_p . За исключением одного водного объекта (оз. Каракель), $C_{\text{экс}}$ составляли 2–3 K_p . В водах оз. Каракель и питающего его ручья концентрации за период наблюдений варьировали от 4 до 7.5 мкг/л (абсолютный максимум для региона). При этом в верховьях Кубани известно множество рудопоявлений и ореолы молибдена. Практического интереса самостоятельные проявления Mo не представляют. Как сопутствующий элемент Mo широко представлен в вольфрамовых рудах, а W является типоморфным элементом Большекавказской минерагенической провинции. Во всех представленных на изучаемой территории минерагенических зонах (Бечасынской, Главной и Передового хребтов, Центрально-Кавказской области) ведущим является вольфрамовое оруденение, все известные рудные поля которого пространственно связаны с магматическими системами, в которых присутствуют граниты, специализированные на W и Mo [1]. В бассейне Теберды отмечено всего несколько проявлений и пунктов минерализации по этим элементам, приуроченных к водоразделу рек Аксат и Теберда, и речные воды здесь отличаются пониженным содержанием Mo. Большинство водных объектов, в которых Mo не был обнаружен, находятся в бассейне Теберды, но зарегистрированы 3 объекта с $C_{\text{экс}}$, расположенные в правобережье Теберды на расстоянии менее 10 км друг от друга (см. рис. 1а) В этом районе не отмечено молибденового оруденения, но существует аномальная зона по As, и в этих трех объектах наблюдается ассоциация повышенных или высоких концентраций As, F, Mo. На водосборе Кубани до ее слияния с Тебердой многочисленные проявления Mo и W (несколько десятков) сосредоточены в непосредственной близости от западного и северо-западного сектора

Эльбрусского вулканического центра в зоне истока р. Уллу-Кам и в бассейне р. Уллу-Хурзук, где выделено геохимическое поле полиэлементного состава. Среди находящихся здесь постоянных водотоков в нескольких обнаружены $C_{\text{выс}}$ и $C_{\text{пов}}$. Три водных объекта подземного происхождения являются притоками р. Уллухурзук, два впадают в р. Уллу-Кам в 6 км и один — в 25 км от ее истока. Концентрации в остальных пунктах ниже 0.3 мкг/л, а во многих ниже ПО. Ниже по течению Кубани были выделены Учкуланское и Даутское рудные поля и Индыш-Аминкольское проявление, для которых подсчитаны запасы вольфрама и молибдена [1, 2]. Именно с ними связаны $C_{\text{экс}}$ в р. Даут, в верховьях которой отмечен достаточно обширный вторичный геохимический ореол рассеяния, и в ручье из пробной штольни на правом берегу р. Индыш. В самих реках Индыш и Аминкол концентрации оказались на уровне от ПО до 0.3 мкг/л. Что касается р. Учкулан и ее притоков, то наличие рудного поля не сказалось на содержании Mo в водах, наибольшая концентрация, отмеченная в р. Махар, составила 1.1 мкг/л, в остальных водных объектах — 0.2–0.5 мкг/л.

Хром. Воды на территории исследования крайне обеднены хромом, уровня K_p достигло всего одно значение в р. Алибек, расцениваемое на фоне общего массива данных как $C_{\text{выс}}$.

Никель. В регионе практически не представлено никелевое оруденение, но этот элемент может быть аксессуарным в вольфрамовых рудах. Для речных вод также было характерно пониженное содержание Ni. Весь диапазон $C_{\text{экс}}$ – $C_{\text{выс}}$ находится в пределах 1–2 K_p . Пункты с такими концентрациями в основном сосредоточены в верховьях Теберды — это реки Аманауз, Алибек, Улу-Муруджу и створ на 23-м км р. Теберда после слияния всех этих рек. В бассейне Кубани $C_{\text{экс}}$ зарегистрированы в совершенно разных местах: верхнем и нижнем створах на самой реке в 6 и 150 км от истока соответственно, притоке р. Мара, а также абсолютный максимум, равный 50.7 мкг/л (см. табл. 2 представлен отдельно от диапазона $C_{\text{экс}}$), в ручье из штольни на р. Индыш.

Марганец. В целом уровень содержания Mn в водах верхней части бассейна Кубани понижен. Концентрации, признанные $C_{\text{выс}}$, были отмечены в 4 пунктах и соответствовали 1–1.3 K_p , который совпадает с ПДК_{рыб}. В группе из 6 $C_{\text{экс}}$ значения широко варьировали, наименьшее составило 2.4 ПДК_{рыб}, а $C_{\text{макс}}$ более чем в 20 раз превысила ПДК_{рыб} и вдвое ПДК_{пит}. В распределении Mn четко выделяется первичный источник загрязнения — молодые изверженные породы Эльбрусского вулканического центра. Это хорошо прослеживается по характеру изменения его концентраций по течению Кубани. Исходная концентрация, измеренная на 6-м км от истока, составила 216.2 мкг/л, уже че-

рез несколько километров она уменьшилась в 3.5 раза, а к 20-му км снизилась примерно до 10 мкг/л и сохранялась на этом уровне до створа на 31-м км. Ниже по течению наблюдался постепенный подъем почти в 2.5 раза после впадения р. Уллухурзук, концентрация Mn в которой составила 52.2 мкг/л и, в свою очередь, повысилась после впадения р. Кюкюртлю, содержащей 68 мкг/л Mn. Как уже упоминалось, именно эти две реки берут начало непосредственно от массива Кюкюртли. Все створы на Кубани до 55-го км и в бассейне ее притока Уллухурзук, а также ручей из штольни составляют группу $C_{\text{выс}} - C_{\text{экс}}$ и отмечены на рис. 16. К моменту выхода реки из высокогорной зоны (89-й км) и в нижнем створе (150-й км) воды содержали уже 4 и 3 мкг/л Mn. В бассейне р. Теберда только в одном пункте р. Алибек концентрация составила 10.8 мкг/л, т.е. была на уровне $C_{\text{выс}}$, K_p и $ПДК_{\text{рыб}}$ (см. табл. 2). Кроме того, в бассейне Теберды отмечено несколько водных объектов с $C_{\text{пов}}$ (5–7 мкг/л). Это р. Аманауз, принятая за исток Теберды, 2 водотока в зоне истока р. Гоначхир и Теберда после слияния рек Аманауз и Гоначхир.

ВЫВОДЫ

На основании анализа данных методами порядковой статистики установлены региональные повышенные, высокие и экстремально высокие концентрации примесей и выявлено распределение соответствующих водных объектов на изучаемой территории с использованием ГИС. Пространственный анализ показал, что в большинстве случаев, но не всегда, они совпадают по местоположению с рудопрооявлениями и шлейфами рассеяния (As, Mo), зонами современного вулканизма под западной вершиной Эльбруса (Al, Li, F, Mg, SO_4^{2-}), пиритизации и распространения осадочных карбонатных и гипсоносных пород (Ca, Mg, Sr, SO_4^{2-}). В основном содержание почти всех компонентов, а именно концентрации в 50–75% водных объектов, ниже кларка. Наблюдается повсеместный дефицит F, содержание Ca, K и Mg в зоне от южного склона Передового до Главного хребта за исключением нескольких водотоков, связанных с Эльбрусским вулканическим центром, не удовлетворяет критерию физиологически полноценных вод.

Вследствие большого количества Cu–Zn и Pb–Zn месторождений, проявлений и пунктов минерализации, концентрации Zn в 80% пунктов наблюдений выше кларка.

Химический состав поверхностных вод в верховьях Кубани в наибольшей степени определяют именно геологические факторы, наличие литохимических аномалий, рудопрооявлений, гидрогеологические условия региона, древний и современный магматизм.

Концентрации компонентов ионного состава, включая микропримеси, во всех выделенных диапазонах значительно выше в неледниковых водных объектах. В особых случаях, а именно, в истоках ледниковых рек на западных склонах Эльбруса, концентрации Cl^- , SO_4^{2-} , Li^+ представляли собой выбросы. Распределения концентраций микроэлементов в ледниковых и неледниковых водных объектах отличаются друг от друга. Одну группу составили Cr, Cu, Pb, Zn, для которых не наблюдалось заметных различий между двумя видами водотоков. В другой группе Al, Mn и в некоторой степени Ni активно выщелачивались из горных пород агрессивными маломинерализованными водами гляциальных потоков, и их концентрации в верховьях ледниковых рек систематически выше концентраций в родниковых ручьях и малых реках неледникового происхождения. В то же время $C_{\text{экс}}$ и в общем более высокий уровень содержания As и Mo были характерны для неледниковых водотоков.

В некоторых водных объектах природное загрязнение As, Al и Li достигает опасного уровня, риски повышаются на фоне физиологической неполноценности ультрапресных вод, обедненных главными катионами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Кавказская. Лист К-38-I, VI (Кисловодск). Объяснительная записка / А.Н. Письменный, А.Н. Пичужков, М.А. Зарубина и др. М.: Московский филиал ФГБУ "ВСЕГЕИ", 2013.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Кавказская. Лист К-37-VI, (XII) (Карачаевск). Объяснительная записка / И.Н. Семенуха, В.И. Черных, В.В. Соколов, М.Г. Деркачева и др. М.: Московский филиал ФГБУ "ВСЕГЕИ", 2021.
3. Дега Н.С. Геоэкологическая оценка водосборного бассейна реки Кубани на территории Карачаево-Черкесской республики // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. XIII. М.: ИИЕТ РАН, 2023. С. 480–485.
4. Дементьев М.С., Дементьева Д.М. Аномальность фоновое содержания тяжелых металлов в водах верховьев реки Кубань // Современные методологические проблемы изучения, оценки и регламентирования факторов окружающей среды, влияющих на здоровье человека / под ред. Ю.А. Рахманина. М.: НИИ ЭЧ и ГОС им. А.Н. Сысина, 2016. Т. 1. С. 167–169.
5. Ежегодники и обзоры [Электронный ресурс]. Гидрохимический институт. 2015. URL: <https://gidrohim.com/node/44> (дата обращения: 18.06.2024)
6. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. Справочник: в 6 кн. / Под ред. Э.К. Буренкова. Кн. 1: S-элементы. М.: "Недра", 1994. 304 с.

7. Комаров Р.С. Природный фактор как возможная причина экстремально высоких концентраций ионов меди в воде притоков реки Кубань // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод: сб. тр. конференции. Ч. 1. Ростов-на-Дону: ФГБУ “Гидрохимический институт”, 2020. С. 210–214.
8. Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю. Река Кубань. Гидрография и режим стока. СПб: Гидрометеиздат, 2005. 498 с.
9. Никаноров А.М. Гидрохимия. Ростов-на-Дону: “НОК”, 2008. 462 с.
10. Онищенко В.В., Дега Н.С., Гербекова Д.Ю. Медико-экологическая парадигма курортно-оздоровительного и рекреационного бассейна реки Теберды Карачаево-Черкесской Республики // Экология человека. 2016. № 10. С. 3–9.
11. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 19 марта 2002 г. N 12 “О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов “Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. Контроль качества. СанПиН 2.1.4.1116-02” (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс] / ГАРАНТ.РУ: [сайт]. [1990]. <https://base.garant.ru/4178351/> (дата обращения: 18.06.2024)
12. РД 52.24.643-2002. Методические указания. Методика комплексной оценки и степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 49 с.
13. Реутова Т.В., Реутова Н.В., Дреева Ф.Р., Хутуев А.М., Керимов А.А. Гидрохимические аномалии в водных объектах национального парка “Приэльбрусье” // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6 (110). С. 144–157.
14. Решетняк О.С., Комаров Р.С. Тенденции изменчивости химического состава и степени загрязненности воды реки Кубань // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 1 (85). С. 30–40.
15. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M., Kerimov A.A. Features of aluminum concentrations in rivers of the mountain zone of the Central Caucasus // Russian Journal of General Chemistry. 2018. V. 88. № 13. P. 2884–2892.

HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF NATURAL WATERS IN THE UPPERCOURSE OF THE KUBAN RIVER

T. V. Reutova^{a, #}, N. V. Reutova^a, F. R. Dreeva^a

^a*Kabardin-Balkar Scientific Center, Russian Academy of Sciences
ul. Balkarova 2, Nalchik, 360017 Russia*

[#]*E-mail: reuttat@yandex.ru*

A full-scale survey of water bodies differing in origin and formation conditions was conducted in the upper reaches of the Kuban River and the basin of its main tributary, the Teberda River (about 90 observation points). The purpose was to determine typical and atypical levels of a wide range of impurities in water, to identify the real sources of impurities entering watercourses, their migration, spatial distribution of water bodies with increased concentrations, and possible associations of ingredients. Concentrations of major ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) and ions of trace elements (F^- , Li^+ , Sr^{2+}) were determined by capillary ionophoresis, trace elements (Al, As, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn), by atomic absorption method with electrothermal atomization. Based on the data analysis by methods of order statistics, i.e. five-number summary with adding internal and external upper adjacent values, regional elevated, high and extremely high concentrations were distinguished and the distribution of relevant water bodies in the studied area using GIS was revealed. Spatial analysis has shown that in most cases, but not always, they coincide in location with ore occurrences and scattering plumes (As, Mo), zones of modern volcanism under the western peak of Elbrus (Al, Li, F, Mg, SO_4^{2-}), of pyritization (SO_4^{2-}), zones with prevalence of sedimentary carbonate and gypsum-bearing rocks (Ca, Mg, Sr, SO_4^{2-}). In most of the water bodies (50–75%) the concentrations of almost all components are below the river water clarks. They are so depleted of essential elements (F, Ca, Mg, K) that they do not meet the criteria of physiological usefulness for drinking water. Due to the large number of Cu–Zn and Pb–Zn deposits, manifestations and mineralization points, Zn concentrations in 80% of the observation points are higher than clark. In some water bodies, natural pollution of As, Al and Li reaches dangerous levels exceeding MPC of drinking water up to 5 times for Li, 8.5 times for Al and 14 for As and habitants and tourists use them for drinking. The risks increase against the background of a deficiency of the main cations inherent in these waters.

Keywords: *natural waters, major ions, potentially toxic elements, regional levels of content /regional distribution of concentrations, Kuban River, Teberda River*

REFERENCES

1. [The State Geological Map of the Russian Federation on a scale of 1:200 000. The second edition. The Caucasian series. Sheet K-38-I, VI, (Kislovodsk). Explanatory note] A.N. Pis'mennyi, A. N. Pichuzhkov, M. A. Zarubina, et al. (Eds.). Moscow, Moscow branch of FSBI VSEGEI, 2013. (in Russian)
2. [The State Geological Map of the Russian Federation on a scale of 1:200 000. The second edition. The Caucasian series. Sheet K-37-VI, (XII) (Karachaevsk). Explanatory note]. I.N. Semenukha, V.I. Chernykh, V.V. Sokolov, et al. (Eds.). Moscow, Moscow branch of FSBI VSEGEI, 2021. (in Russian)
3. Dega, N.S. [Geoecological assessment of the drainage basin of the Kuban River in the territory of the Karachay-Cherkess Republic]. In: [Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus. Vol. XIII]. Moscow, IHST RAS Publ., 2023. pp. 480–485. (in Russian)
4. Dement'ev, M.S., Dement'eva D.M. [Anomaly of the background content of heavy metals in the waters of the upper reaches of the Kuban River]. In: [Modern methodological problems of studying, evaluating and regulating environmental factors affecting human health] Moscow, Scientific Research Institute of Human Ecology and Environmental Hygiene named after A.N. Sysin, 2016. vol. 1. pp. 167–169. (in Russian)
5. [Yearbooks and reviews]. Available at: <https://gidrohim.com/node/44> (accessed 18.06.2024) (in Russian)
6. Ivanov, V.V. [Ecological geochemistry of elements. Reference book: In 6 books. Book 1: S-elements.], E.K. Burenkov, Eds. Moscow, "Nedra" Publ., 1994, 304 pp. (in Russian)
7. Komarov, R.S. [Natural factor as a possible cause of extremely high concentrations of copper ions in the water of tributaries of the Kuban River]. In [Modern problems of hydrochemistry and monitoring of surface water quality. Part 1]. Rostov-on-Don, Federal State Budgetary Institution "Hydrochemical Institute", 2020, pp. 210–214. (in Russian)
8. Lurie, P.M., Panov, V.D., Tkachenko, Yu.Yu. [Kuban River. Hydrography and flow regime]. St. Petersburg, Hydrometeoizdat Publ., 2005. 498 p. (in Russian)
9. Nikanorov, A.M. [Hydrochemistry]. Rostov-on-Don, "NOK" Publ., 2008, 462 p. (in Russian).
10. Onishchenko, V.V., Dega, N.S., Gerbekova, D.Yu. [Medico-ecological paradigm of a health resort and recreational Teberda River basin of the Karachay-Cherkess Republic]. *Ehkologiya cheloveka*, 2016, no. 10, pp. 3–9. (in Russian)
11. [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated March 19, 2002 No. 12 "On the introduction of sanitary and epidemiological rules and regulations "Drinking water. Hygienic requirements for the quality of water packaged in a container. Quality control. SanPiN 2.1.4.1116-02" (with amendments and additions)]. Available at: <https://base.garant.ru/4178351/> (accessed 18.06.2024) (in Russian)
12. [Guidance document 52.24.643-2002. Methodological guidelines. Methodology of complex assessment and degree of contamination of surface waters by hydrochemical indicators]. St. Petersburg, Hydrometeoizdat Publ., 2002. 49 p. (in Russian)
13. Reutova, T.V., Reutova, N.V., Dreeva, F.R., Khutuev, A.M., Kerimov, A.A. [Hydrochemical anomalies in the water bodies of the "Prielbrusye" National Park]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2022, no. 6 (110), pp. 144–157. (in Russian)
14. Reshetnyak, O.S., Komarov, R.S. [Trends in the variability of the chemical composition and water pollution level in the Kuban River]. *Voda i ehkologiya: problemy i resheniya*, 2021, no. 1 (85), pp. 30–40. (in Russian)
15. Reutova, N.V., Reutova, T.V., Dreeva, F.R., Khutuev, A.M., Kerimov, A.A. [Features of aluminum concentrations in rivers of the mountain zone of the Central Caucas]. *Russian Journal of General Chemistry*. 2018, vol. 88, no. 13, pp. 2884–2892.

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 553.6 (504)

БАРЬЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОЛИГОНОВ ТКО

© 2025 г. В. Г. Заиканов¹, И. Н. Заиканова^{1,*}

¹Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: izaikanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.10.2024 г.

После доработки 15.11.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

В статье рассматриваются понятийный аппарат и возможность применения барьеров безопасности при проектировании полигонов ТКО. Оцениваются их существующие классификации и опыт применения в настоящее время. В статье представлено использование концепции безопасности, базирующейся на систематическом описании различных типов барьеров (мультибарьеры) на примере барьеров для полигонов ТКО. Рассматривается международный опыт использования барьеров безопасности, а также их применение при проектировании полигонов ТКО в России. Предлагается широко использовать учение о геохимических барьерах, являющееся достижением российской науки. Рассматриваются варианты создания искусственных геохимических барьеров, хорошо зарекомендовавших себя для нейтрализации опасных отходов металлургической и горнодобывающей промышленности. Приводится принципиальная схема метода оценки ожидаемой опасности — “галстук-бабочка”, и рассматривается возможность его применения для оценки рисков опасности воздействия окружающей среды на полигон и полигона на геологическую среду.

Ключевые слова: барьер, безопасность, полигон, твердые коммунальные отходы

DOI: 10.31857/S0869780925020058 EDN: EРХСWН

ВВЕДЕНИЕ

Термин “барьер” вошел в практику охраны окружающей среды человека из системы базовых понятий техники безопасности человека на производственных и других объектах, где использование концепции барьеров безопасности базируется на систематическом описании различных их типов. В статье рассматривается опыт применения барьеров безопасности, который с некоторыми оговорками и дополнениями можно применить в отношении барьеров, используемых при проектировании полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО). В качестве основы целесообразно взять теорию, а отчасти и практику применения таких понятий, как барьеры, барьерная функция, барьерная система и их разновидности, рассмотренных в работах, большей частью, зарубежных авторов [14–16].

В мировой и отечественной научной литературе понятие “барьеры безопасности” применяется в достаточно широком смысле. В российском

законодательстве этот термин употребляется исключительно в связи с менеджментом рисков, а именно: в стандартах ГОСТ Р 54141, ГОСТ Р 54142, ГОСТ Р 54143, ГОСТ Р 54144, хотя, как это предусмотрено Постановлением Правительства РФ от 28.05.2021 № 815 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил, в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований федерального закона “Технический регламент о безопасности зданий и сооружений”» (30 декабря 2009 г. N 384-ФЗ), они не относятся к числу обязательных для исполнения. Согласно нормативным документам источниками риска при проектировании полигонов ТКО являются близкое залегание грунтовых вод, неблагоприятные для размещения полигона геологическое строение, гидрогеологические условия, рельеф, климатические условия и др. Соблюдение требований безопасности при этом возлагается на барьеры безопасности, т.е. запланированные меры, обеспечивающие защиту в процессе функционирования полигонов ТКО, а в

случае опасности или аварии, смягчающие последствия, вызванные неблагоприятными событиями.

Прежде чем говорить о безопасности, необходимо определить, что такое опасность и последствия ее реализации. Принимая во внимание исследования Trbojevic V.M. [17], предлагаем такую адаптацию исследований автора к тематике полигонов ТКО.

Опасность — физическая ситуация, состояние или объект, которые потенциально могут причинить ущерб окружающей среде, например, опасность затопления полигона ТКО.

Угроза относится к событиям, при которых опасность может быть реализована, например, угрозой затопления полигона ТКО может быть возможность прорыва дамбы водохранилища, расположенного недалеко от него.

Неблагоприятное событие — опасность, реализовавшаяся в результате непреднамеренного отклонения от нормальной ситуации, в результате чего причиняется определенный ущерб. Дата, обстоятельства и место совершения события фиксируются.

Последствие — результат от реализовавшегося события, который может выражаться в виде ущерба полигону, геологической среде, другим компонентам окружающей среды, населению и т.д.

Барьер безопасности — конструктивный элемент сооружения, в частности, полигона ТКО. Он может быть физическим или нефизическим, а также их сочетанием, и предназначен для предотвращения, контроля, смягчения последствий или защиты от нежелательных событий.

Режим ослабления/отказа барьера указывает на отклонение функции барьера от проектного замысла. Это может быть результатом ослабления функции барьера, полного отказа или его удаления. Примерами разрушения барьера могут быть постепенное разрушение тканевых и других барьеров, предусмотренных для изоляции отдельных слоев свалочной массы от воздействия воды, фильтрата; нарушение работы системы удаления свалочного газа на полигоне и даже ошибка, допущенная при обучении персонала действиям при аварийных ситуациях.

Устойчивость — характеристика системы управления безопасностью природных, технологических и других процессов, позволяющая предвидеть и устранять угрозы для ее целей в области безопасности функционирования полигона ТКО.

Терминология, связанная со стратегией обеспечения безопасности для окружающей среды и населения проектируемых полигонов ТКО, требует усовершенствования, расширение ее диапазона позволяет давать более точные оценки и рекоменда-

ции. Согласно существующим литературным данным [8], приняты следующие определения, связанные с барьерами.

Барьеры безопасности — функция, изделие, материал, программное обеспечение, действие оператора и т.д., цель которых заключается в остановке или замедлении развития опасной ситуации. Барьером безопасности также могут быть физическое свойство, конструктивная характеристика, технологическое устройство или вмешательство человека, например, сигнал тревоги с действиями оператора. К ним можно добавить естественные и искусственные барьеры, которые действуют в природной среде (о них будет речь ниже).

Барьерная функция — деятельность или действие, направленные на предотвращение, контроль или смягчение нежелательных событий или аварий. В отношении охраны природной среды при проектировании полигонов ТКО это виды обеспечения безопасности практически всех компонентов природной среды и социума. Успешная реализация барьерной функции оказывает значительное влияние на нейтрализацию развития нежелательных событий или аварий.

Барьерная система — совокупность связанных между собой элементов, которые спроектированы и реализованы для исполнения одной или нескольких барьерных функций. Барьерная система создается для того, чтобы реализовать всю совокупность барьерных функций для обеспечения охраны природной среды и, в частности, геологической составляющей. В российской и зарубежной литературе по полигонам ТКО используется синоним барьерной системы — мультибарьер.

Барьерную систему целесообразно дифференцировать на *барьерные элементы или подсистемы*, необходимые для исполнения нескольких или одной барьерной функции. Барьерная подсистема может содержать также несколько резервных барьерных элементов, существующих, например, на случай аварийных ситуаций. Барьерная система может включать элементы различных типов, например, физические и технические элементы, т.е. аппаратные и программные, организационные, контрольные и другие структуры, без которых барьерная функция не может быть выполнена [16]. Без обоснованного на этапе проектирования полигона ТКО комплекса барьерных функций не может быть обеспечена охрана социума, природной и, в частности, геологической среды. Не исключено, что для реализации одной барьерной функции потребуется несколько барьерных систем, например, для нейтрализации затопления необходимо предусмотреть барьеры в самом свалочном теле, на днище и в склонах котлована полигона.

Целесообразно рассмотреть также существующие классификации барьеров. Наиболее

детальная классификация барьеров безопасности предлагается методом ARAMIS [12]. В отличие от большинства других методов, ARAMIS различает следующие барьерные функции: *избежать* (сделать потенциально опасное событие невозможным); *препятствовать* (затормозить потенциально опасное развитие событий, поместить на пути развития событий препятствие); *управлять* (обнаружить потенциально опасное событие и вернуть систему назад в безопасное состояние); *ограничить, уменьшить или смягчить* (обнаружить потенциально опасное событие и ограничить его во времени и/или пространстве, уменьшить его масштаб или смягчить воздействия опасного явления на оборудование, человека и окружающую среду). Согласно методике ARAMIS выделяют следующие барьерные системы.

Пассивные барьеры постоянно функционируют и не требуют действий оператора, источника энергии и информации. Они могут быть физическими (обвалование, стены и т.д.), постоянными (система предотвращения коррозии), отвод подземных вод или геологический барьер на полигоне ТКО.

Активируемые барьеры устанавливают предвзятые условия, необходимые для совершения действия. Таким образом, для срабатывания данные барьеры должны быть автоматическими или активируемыми вручную. Эти барьеры могут быть механическими, которые требуется активировать для исполнения их функции (аппаратные). Активируемым барьерам всегда требуется последовательность “обнаружение—оценка—действие”. Данная последовательность может быть реализована с использованием аппаратных, программных и (или) человеческих действий.

Trbojevic V.M. [17] предлагает несколько отличный подход к классификации барьеров безопасности, основанный на оценке их эффективности в случае возникновения потенциально опасной ситуации. В зависимости от степени эффективности (высокая, средняя, низкая) выделяют следующие типы барьеров безопасности.

Технические (высокая эффективность). Могут предотвратить распространение факторов риска, снизить опасность ситуации, смягчить последствия или уменьшить вероятность возникновения факторов риска. Если технический барьер не срабатывает, то угроза передается на другой технический барьер до реализации потенциально опасного события (до достижения инициирующего события). Примерами технических барьеров, действующих по такому принципу, могут служить дренажная труба, проложенная в теле свалки и система гидроизоляции на ее контакте с основанием на полигоне ТКО.

Выделяют следующие подкатегории технических барьеров: *технические активные*, которые

срабатывают по требованию (аварийный отсекающий клапан, дренажная система пожаротушения, аварийная емкость); *технические пассивные* функционируют на постоянной основе, исполняют барьерную функцию одним своим присутствием (предохранительный клапан, обвалование, пожаропрочные и взрывонепроницаемые перегородки и т.п.); *технические барьеры контроля*, активирующие другие предотвращающие или смягчающие последствия опасного события барьеры (газосигнализаторы, система пожарной сигнализации, система оповещения об аварии и т.д.). Барьеры данного типа не могут предотвратить развитие аварии, но могут активировать другие барьеры, которые это сделают.

Человеческие (организационные) (средняя эффективность). Способствуют контролю процесса или деятельности, могут уменьшить вероятность инициирующего события путем укрепления других барьеров или предотвращения их ослабления. Но в случае, если потенциально опасное событие уже инициировано, то барьеры этого типа, как правило, не могут ни предотвратить его развитие, ни уменьшить последствия. На полигонах ТКО этот тип барьеров имеет широкое применение, он необходим для ведения мониторинга состояния геологической среды, слежения за соблюдением правил эксплуатации полигона, отчасти при выполнении сортировки отходов и др.

Фундаментальные (низкая эффективность). Их действие разделяется во времени от возникновения угрозы до реализации фактора риска. Тем не менее фундаментальные барьеры вносят чрезвычайно важный и эффективный вклад в обеспечение безопасности системы путем проверок и контроля уязвимых мест системы и исходных причин отказов. К фундаментальным барьерам на полигонах ТКО можно отнести геологическое строение и гидрогеологические условия, как правило, “усиленные” применением технических барьеров.

В российских нормативно-правовых документах термин “барьеры безопасности” также упоминается [4–6, 10, 11]. В ГОСТ [4] дано определение слоя защиты, относящееся к методу анализа слоев защиты (LOPA): “*Слой защиты (protection layer): самостоятельный механизм, снижающий риск с помощью управления риском, его предотвращения или ослабления*”. Таким слоем, рассмотренным подробно ниже, при строительстве полигонов ТКО являются породы естественного или искусственного происхождения, обеспечивающие гидроизоляцию свалочного тела. Такое определение практически соответствует данному ниже определению геологического барьера безопасности.

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИБАРЬЕРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОЛИГОНОВ ТКО

Полигоны ТКО — природоохранные сооружения, которые предназначены для сбора, обезвреживания и захоронения бытовых отходов. При этом сам полигон — это объект повышенной геохимической опасности, источник загрязнения окружающей среды. В идеале инородное для природной среды тело должно быть изолировано от контактов до тех пор, пока его воздействие не станет нейтральным. Для полной локализации свалочного тела используются различные подходы, но главное условие — это возведение “стен” между свалочным телом и контактирующей с ним геологической средой, подземными водами, почвами и другими компонентами природы.

Для обеспечения долгосрочной безопасности полигоны ТКО должны быть оборудованы барьерной системой в соответствии с принятой мультибарьерной концепцией. Эта концепция основана на том, что даже если какой-то барьер выйдет из строя, все равно будет обеспечена эффективная защита окружающей среды. Для этого необходимо использовать комплекс искусственных и естественных барьеров, который включает следующие составляющие.

1. *Раздельный сбор отходов.* Этот барьер обеспечивает возможность разных подходов к захоронению или утилизации отходов. Важным следствием этого барьера на пути к свалке является уменьшение массы захороняемых отходов, а значит и размера полигона.

2. *Предварительная сортировка отходов.* Отходы, содержащие биоразлагаемые и другие органические компоненты, такие как ТКО, по мнению специалистов, должны быть предварительно рассортированы на мусоросжигательных заводах или заводах механико-биологической очистки, прежде чем они будут отправлены на полигоны. Это способствует уменьшению загрязняющих атмосферу свалочных газов и загрязненных фильтрующих вод.

3. *Геологический барьер.* Геологическим барьером называется естественный грунт, залегающий под свалочным телом и вокруг него, который своими характеристиками и размерами в значительной степени препятствует распространению загрязняющих веществ. Геологический барьер в основном состоит из естественных отложений слабопроницаемых пород достаточной мощности с высоким потенциалом удержания загрязняющих веществ. Предполагается, что геологический барьер имеет обширное распространение за пределами зоны залегания свалочного тела.

4. *Минеральный уплотнительный слой.* Прослойка (с коэффициентом проницаемости K_f не менее

$5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$) с мощностью 0.50 м и конвекционным замком или пластиковая прокладка толщиной 2.5 мм из пленки в качестве комбинированного уплотнения.

5. *Мощный дренажный слой* создается для удержания и отвода фильтрата. Толщина слоя из гравия — 0.3 м.

6. *Ограждающие стены и днища полигона.* В свалочной толще происходят биологические, химические и физические процессы. Таким образом, для защиты окружающей среды полигон должен быть безопасным и иметь такую конструкцию, чтобы не допускать утечки свалочного газа и фильтрата в геологическую среду.

7. *Система гидроизоляции основания полигона с захватом и обработкой фильтрата.* Защита геологической среды и почв может быть достигнута за счет сочетания геологического барьера и системы гидроизоляции в основании свалочного тела. На полигонах ТКО достаточно установить слой минерального дренажа толщиной не менее 0.3 м над геологическим барьером, тогда как на полигонах с более высокими классами требуются дополнительные компоненты гидроизоляции (например, глина, пластиковая гидроизоляционная пленка). Важный элемент гидроизоляции — дренажные трубы, сбрасывающие фильтрат в очистные сооружения.

8. *Контроль фильтрата.* Оператор полигона должен поддерживать минимальное количество фильтрата, насколько это возможно в соответствии с современным уровнем оборудования полигона. Образующиеся фильтраты собираются и при необходимости обрабатываются на соответствующей очистной установке.

9. *Система гидроизоляции поверхности свалочного тела* на полигоне и сбора атмосферных осадков после его закрытия. Поверхностное уплотнение свалочного тела после его рекультивации должно предотвращать попадание в него осадков, а также утечку любого возможного свалочного газа. То же самое относится к дренажному слою, двум компонентам гидроизоляции и, при необходимости, к гидроизоляционным элементам. Необходимы выравнивающие и отводящие газ слои. Рекультивационный слой можно заменить техническим функциональным слоем, если этого требует целевое использование полигона (например, в качестве транспортной зоны, парковки и т.п.).

10. *Очистные сооружения, в которые сбрасываются фильтрат и вода, поступающая из атмосферы.*

11. *Последующий уход.* Если полигон рекультивирован, устанавливается необходимая система поверхностной гидроизоляции и производится вывод из эксплуатации. Измерения и проверки, производимые на этапах осаднения и эксплуа-

тации, должны продолжаться и после вывода его из эксплуатации на этапе последующего наблюдения. Должны измеряться следующие показатели: количество осадков, уровень и состав грунтовых вод, количество и состав фильтрата и свалочного газа. Кроме того, компоненты гидроизоляции регулярно проверяются на работоспособность. Только после того, как на этапе наблюдения будет достигнуто состояние свалки, при котором больше не может быть постоянного ущерба для населения без необходимости дальнейших технических или эксплуатационных действий, ответственный орган должен освободить свалку от последующего наблюдения.

Понятно, что весь комплекс названных выше действий должен получить свое подтверждение в соответствующих нормативных документах, чего сейчас нет!

Геохимические барьеры

Широкий спектр проблем охраны окружающей среды выявил важнейшую научную и прикладную область применения геохимических барьеров — участков пространства, на которых происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрации [1]. В последние десятилетия для защиты окружающей среды от загрязнения наметилась тенденция использования геохимических барьеров, применение которых в ряде случаев позволяет отказаться от строительства сложных очистных сооружений и проведения других дорогостоящих природоохранных мероприятий. Однако широкое использование геохимических барьеров сдерживается отсутствием теоретических основ их практического применения при проектировании полигонов ТКО.

По мнению А.И. Перельмана [12], геохимический барьер — это участок литосферы, где резко уменьшается интенсивность миграции химических веществ и, как следствие, происходит аккумуляция элементов и соединений. Причем эти участки могут быть естественными и созданными искусственно. Широко применяются искусственные барьеры, которые могут быть спроектированы в зависимости от поставленной цели. Необходимо различать типы барьеров по характеру миграции загрязняющих веществ. Есть барьеры, “останавливающие” их перемещение. К ним относятся всякого рода преграды из бетона, пленок, глинистых грунтов и др. Геохимические барьеры в понимании А.И. Перельмана — это “пропускающие” барьеры, они не препятствуют движению растворов (фильтрата), но меняют их кислотность, осаждают на себе загрязняющие вещества, вступают с ними в реакцию и т.д. Учитывать особенности обоих типов барьеров очень важно, как и возможность их комплексного использования.

В настоящее время наметилось широкое применение в качестве барьера бентонитов, которые помимо того, что являются по гранулометрическому составу “останавливающей” разновидностью барьеров, обладают также высокой способностью адсорбировать различные вещества (масла, металлы, бактерии и токсины). Кроме того, они используются еще и в качестве осушающего агента.

Использование геохимических барьеров в области охраны геологической среды при создании полигонов ТКО позволяет решать возникающие проблемы наиболее простым способом, учитывая естественные защитные функции окружающей среды. Для этого используются методы, основанные на ускорении естественной трансформации загрязняющих веществ в неопасные формы или их целенаправленной концентрации на определенных, ограниченных по площади участках литосферы. Основываясь на теории геохимических барьеров, можно сформулировать принцип стратегического подхода к защите геологической среды от загрязнения.

Геохимические барьеры есть во всех природных обстановках, часто они моделируются и используются в хозяйственной деятельности. Образование физико-химических барьеров связано с резким изменением физико-химических условий: температуры, давления, окислительно-восстановительных, щелочно-кислотных и др. По факторам, определяющим концентрацию элементов, А.И. Перельман выделил классы барьеров, обозначенные им буквами латинского алфавита: кислородный (А), сульфидный или сероводородный (В), глеевый (С), щелочной (D), кислый (Е), испарительный (F), сорбционный (G), термодинамический (H), сульфатный (I) [12].

Главными показателями барьера являются *градиент G* , который характеризует изменение геохимических показателей (температура, давление, Eh, pH и др.) в направлении миграции химических элементов в зависимости от ширины барьера, и *контрастность S* — отношение величины геохимических показателей в направлении миграции до и после барьера. Емкость барьера представляет собой величину, характеризующую максимальное количество веществ, способных накапливаться в единице массы субстрата.

Для создания геохимического барьера в основании и склонах полигона ТКО на этапе его проектирования необходимо проводить целый спектр исследований, включая определение показателя фильтрации каждого литологического пласта, составляющего геологическое строение территории, а также их химического состава и инженерно-геологических свойств. Если на доступной для строительства полигона глубине есть глинистые горизонты, они могут служить природным

фундаментальным барьером, препятствующим попаданию фильтрата в нижележащие горизонты и подземные воды. В качестве примера можно привести полигон “Кучино”, расположенный на месте отработанного глиняного карьера Кучинского керамического комбината [14]. В РФ и других странах принято, что глинистый слой на полигоне ТКО должен быть не менее 2–3 м. Если такой слой отсутствует в геологическом разрезе, его создают искусственно.

Для выбора типа барьера, кроме проведения комплекса лабораторных исследований, которые позволят оценить естественные защитные свойства среды, необходимо выбрать реагенты, способные выполнить роль барьеров. После этого может быть создана модель барьера и технологическая схема его создания: количество реагентов, способы их внесения, конструктивные особенности и т.д. Частным случаем этого принципа может являться разработка методов, основанных на поиске естественных участков литосферы с подобными свойствами в отношении загрязняющих веществ [14]. В качестве материалов для создания геохимических барьеров могут служить почвы, грунтовые толщи, торф и др. Для искусственных геохимических барьеров могут использоваться отходы горнопромышленного комплекса, содержащие химически активные материалы; смеси химически активных и модифицированных различным образом минералов; продукты и отходы химико-металлургической переработки руд и концентратов и др.

В зависимости от состава загрязнителей могут применяться в комплексе с природными образованиями и производственные отходы, что значительно снижает затраты и в известной мере решает проблему их утилизации. В ряде случаев локализация загрязнения может осуществляться, если при выборе участков складирования отходов используются и активизируются барьерные свойства самой природной среды.

Для создания геохимических барьеров, обеспечивающих условия консервации отходов и их полного разложения, необходимо учитывать не только фильтрационные, но и адсорбционные свойства грунтов оснований и бортов полигонов. Поскольку фильтрат полигонов ТКО обычно имеет кислую реакцию, для выпадения из него загрязняющих веществ могут использоваться карбонатные породы.

Разновидности искусственных мультибарьеров

Часто, когда спектр загрязнителей не позволяет защитить окружающую среду с помощью какого-либо одного вида барьеров, для создания геохимических барьеров применяются природные или природоподобные материалы в комбинации в виде систем искусственных барьеров. Полезную информацию при этом может дать изучение при-

родных и техногенных аналогов геохимических барьеров. Например, применение для минимизации вредного влияния на окружающую среду отходов Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал) был использован аналог природного материала — модифицированный торф с повышенным содержанием гуминовых кислот [2]. В качестве дополнительного сорбента был добавлен мраморизованный известняк Салаирского рудного поля с примесью доломита. При добавлении известняка происходит нейтрализация кислых растворов, а применение гуматов способствует образованию труднорастворимых соединений, в том числе с участием тяжелых металлов.

К первой группе техногенных барьеров относятся средства, предназначенные для задерживания загрязняющих веществ: фильтры, очистные сооружения, отстойники. Ко второй — “встроенные” техногенные геохимические барьеры, формирующиеся благодаря введению в природную среду веществ, резко меняющих геохимию природных процессов [13].

Отличительная особенность искусственных геохимических барьеров — возможность аккумуляции таких веществ, как нефтепродукты, полиароматические углеводороды, пестициды и др. Концентрации веществ, имеющих природные аналоги, на искусственных барьерах в ряде случаев значительно выше, чем на природных.

При использовании “пропускающих” барьеров необходимо учитывать такую их особенность, как кольматация, т.е. снижение фильтрационных характеристик фильтрующих элементов. В зарубежной литературе термин “кольматация” применяется для обозначения процесса механического осаждения частиц в поровом пространстве, а для обозначения химического осаждения различных минеральных соединений используется термин “инкрустация” (от англ. *incrustation* — образование корки, кора, плотное отложение). Эффективность работы фильтрующих барьеров значительно зависит от кольматационно-суффозионных процессов на контакте свалочной толщи полигона и геохимического барьера, а также образования на нем осадков механического, физико-химического и биологического происхождения. Эти явления определяют как мощность (ширину, по А.И. Перельману) и продолжительность действия такого барьера.

Сущность этих процессов необходимо знать для разработки методов подбора, расчета мощности барьера и продолжительности его службы. Кольматация может способствовать образованию искусственного механического барьера, ее можно использовать для уплотнения контакта склонов и днища свалочного тела. В результате кольматации происходит процесс заполнения порового пространства грунта или разного рода покрытий,

защищающих геологическую среду от проникновения более мелких частиц, находящихся во взвешенном состоянии в фильтрате. Кольматация в данном случае происходит благодаря механическому заполнению пор грунта и поверхностному взаимодействию частиц. Твердые взвешенные частицы суспензии, которой является фильтрат, могут механически задерживаться в порах грунтов, а также вступать в физико-химические взаимодействия со скелетом грунтового барьера и друг с другом с образованием коагуляционных структурных связей [3, 7].

Особую группу барьеров представляют искусственные биогеохимические барьеры, которые могут применяться для микробиологической очистки фильтрата. Например, использование сообщества микроорганизмов, которые активно участвуют в процессах оглеения с выносом загрязняющих веществ и их трансформацией. В основе биоорганического комплекса, используемого для выщелачивания металлов, лежит торф с различными добавками.

Одним из возможных способов удаления взвешенных частиц могут быть искусственные, а в ряде случаев и естественные механические геохимические барьеры, предусматривающие пропускание фильтрата через фильтры из местных грунтов и отвалов. Подобные механические геохимические барьеры применяются для очистки от взвешенных частиц вод, образующихся при угледобыче [9]. Исследования, проведенные Ю.В. Лесиным, показали, что наиболее простую конструкцию имеют фильтры, размещенные в естественных или искусственных выемках (оврагах, логах, старых горных выработках и т.п.).

В ходе эксплуатации любого типа барьеров должны проводиться мониторинг его эффективности, вноситься необходимые корректировки в технологию. Эти действия должны доказательно найти свое отражение в нормативных документах по проектированию и эксплуатации полигонов ТКО.

Широкое применение геохимических барьеров сдерживается отсутствием методологии, позволяющей перейти от учения о геохимических барьерах к их практическому использованию при проектировании полигонов ТКО.

Особо надо остановиться на укреплении дна свалок, поскольку через него может осуществляться миграция фильтрата в геологическую среду и подземные воды. Применяемые в настоящее время в нашей стране изоляционные материалы не всегда являются оптимальным решением, поскольку подвержены со временем разрушению, в том числе и после рекультивации свалки, когда в ней не исключается действие процесса образования фильтрата. Поэтому, учитывая долгосрочную перспективу существования полигонов захороне-

ния ТБО, необходимо принять особо строгие меры по изоляции их днищ с образованием соответствующих барьеров.

В качестве одного из положительных примеров создания таких барьеров можно привести опыт Германии (рис. 1). На принципиальной схеме гидроизоляции и дренажа основания свалочного тела показаны несколько барьеров:

- защитный и фильтрующий слой, верхняя насыпь мин. 40 см,
- труба для фильтрата, находится на асфальтовом покрытии,
- гравий для укладки трубы,
- фильтрующий нетканый материал, который применяется для гидроизоляции поверхности всей системы изолирующих барьеров и насыпей, труб для удаления фильтрата,
- асфальтовое гидроизоляционное покрытие,
- связующий слой под асфальтовым покрытием,
- фундаментный слой (насыпь из гравия и песка),
- насыпи для прокладки труб,
- труба для фильтрата ниже контакта мультибарьера и основания свалки,
- система траншей под свалкой для прокладки труб и др.

Для проектирования барьеров на полигонах ТКО необходимо выполнение нескольких условий. Во-первых, должны быть разработаны теоретические основы применения разных видов барьеров при проектировании полигонов ТКО в разных типах геологических условий (в зависимости от механического, химического состава грунтов, гидрогеологических условий, опасных процессов и др.). Барьеры для этого типа хозяйственного использования должны быть классифицированы, их применение должно быть теоретически аргументировано, особенно это касается искусственных природно-техногенных и техногенных видов барьеров, которые применяются без должного опытного обоснования.

Во-вторых, должны быть разработаны нормативные требования к применению барьеров для полигонов с учетом региональных особенностей, к ним относятся области распространения многолетнемерзлых пород, карста, горные и предгорные территории, природно-климатические зоны, болотные системы и др. Все эти условия необходимо учитывать при проектировании безопасных для геологической среды полигонов ТКО.

В качестве перспективного метода анализа проблем, выбора барьеров, поиска решений при проектировании полигонов ТКО предлагается

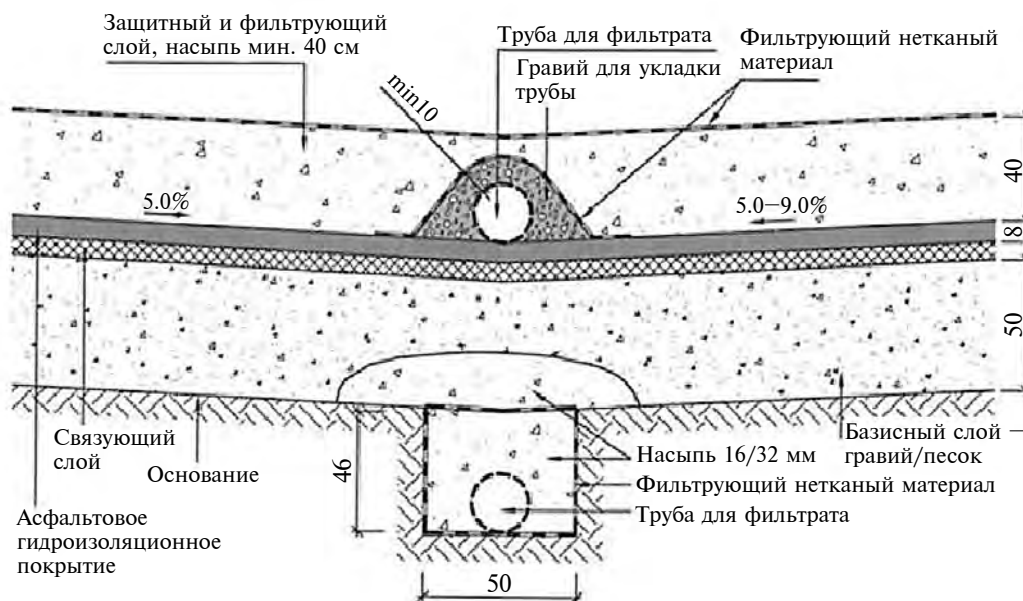


Рис. 1. Принципиальная схема гидроизоляции и уплотнения основания свалки [18].

метод “галстук-бабочка” (англ. *bow-tie analysis*) — один из наиболее наглядных методов при анализе рисков, позволяющий показать связь источников риска и последствий его реализации. В ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 [5] даны краткое описание и приблизительный алгоритм метода анализа “галстук-бабочка”¹, приведены преимущества и недостатки метода. Создание мультибарьера (системы барьеров) по принципу “галстук-бабочка” сводится к комбинированию “дерева отказов” и “дерева событий” и расстановке на полученной таким образом диаграмме выделенных барьеров безопасности. Более подробный и значительно усовершенствованный метод анализа “галстук-бабочка” представлен на рис. 2.

На рис. 3 представлен принцип создания возможной системы барьеров на основе принципа “галстук-бабочка” путем анализа отрицательного воздействия на полигон ТКО и самого полигона на геологическую среду. Анализ по методу “гал-

стук-бабочка” следует строить в соответствии со следующей процедурой.

- Определение опасного события, выбранного для анализа, и его отображение в качестве центрального узла “галстука-бабочки”.
- Составление перечня причин события с помощью исследования источников риска (или опасности).
- Идентификация механизма развития опасности до критического события.
- Проведение линии, отделяющей причину от события, что позволяет сформировать левую сторону бабочки. Дополнительно могут быть идентифицированы и включены в диаграмму факторы, которые могут привести к эскалации опасного события и его последствий.
- Нанесение поперек линии вертикальных преград, соответствующих барьерам, предотвращающим нежелательные последствия. Если определены факторы, которые могут вызвать эскалацию опасного события, то дополнительно могут быть представлены барьеры, предупреждающие подобную эскалацию. Данный подход может быть использован для положительных последствий, когда преграды отражают средства управления, стимулирующие появление и развитие события.
- Идентификация в правой стороне бабочки различных последствий опасного события и проведение линий, соединяющих центральное событие с каждым возможным последствием.
- Изображение барьеров в качестве преград по направлению к последствию. Данный подход может быть использован для положительных

¹ Анализ “галстук-бабочка” представляет собой способ описания пути развития опасного события от причин до последствий при помощи схемы с указанием барьеров (мер управления и/или контроля) между причинами и опасными событиями, а также опасными событиями и их последствиями. Данный метод сочетает исследование причин события с помощью дерева неисправностей и анализ последствий с помощью дерева событий. Основное внимание метода “галстук-бабочка” сфокусировано на барьерах между причинами и опасными событиями, опасными событиями и последствиями. <https://sudact.ru/law/prikaz-mintruda-rossii-ot-28122021-n-926/rekomendatsii-po-vyboru-metodov-otsenki-iv/4.2/4.2.2/?ysclid=m0fbkfq0o0251806348>

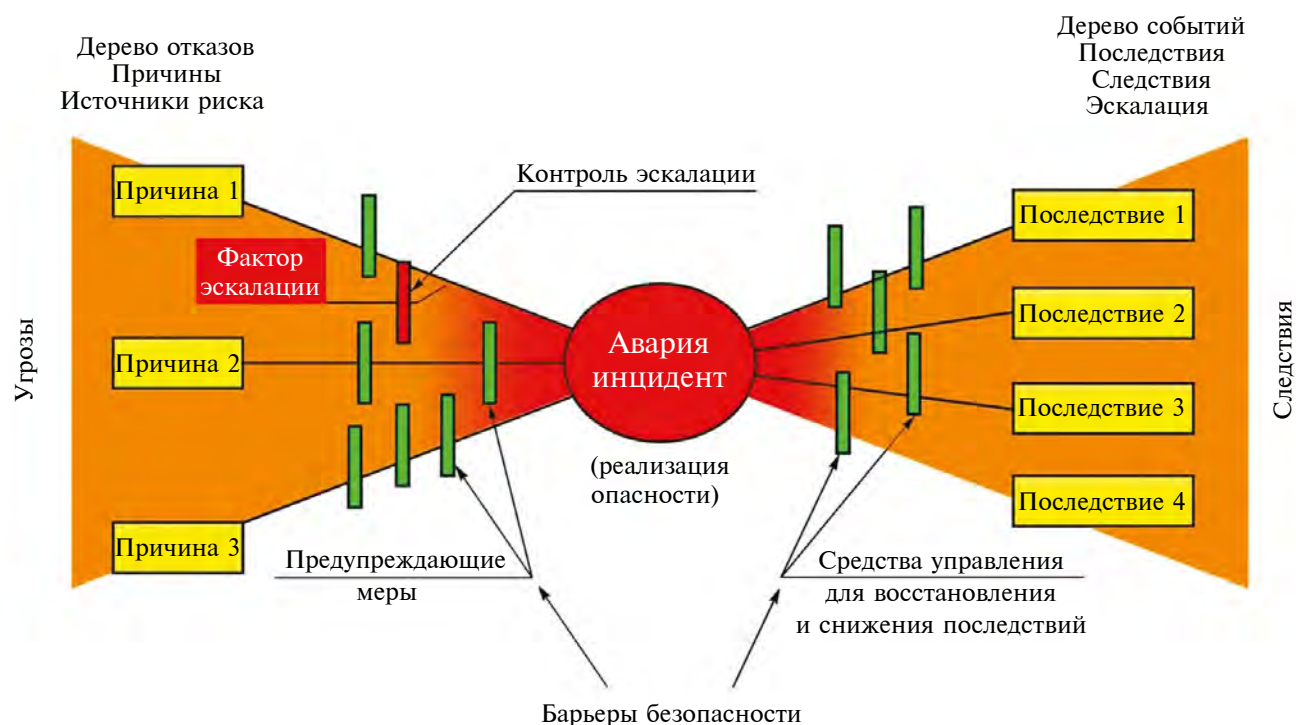


Рис. 2. Принципиальная схема метода оценки “галстук-бабочка” [5].



Рис. 3. Анализ возможного негативного воздействия окружающей среды на полигон ТКО и полигона на геологическую среду по методу “галстук-бабочка”.

последствий, когда преграды отражают средства управления, обеспечивающие появление благоприятных последствий.

— Отображение под диаграммой “галстук-бабочка” вспомогательных функций управления, относящихся к средствам управления (таких как

обучение и проверки), и соединение их с соответствующим средством управления.

В диаграмме “галстук-бабочка” могут быть применены некоторые виды количественной оценки, например, в ситуации, когда пути независимы и известна вероятность конкретных последствий или результатов. Подобная количественная оценка необходима для обеспечения эффективности управления. Однако необходимо учитывать, что во многих ситуациях пути и барьеры взаимозависимы, и средства управления могут быть связаны с выбранным методом оценки, следовательно, эффективность управления является неопределенной.

ВЫВОДЫ

Концептуально активное применения барьеров при проектировании и эксплуатации полигонов ТКО с учетом всего вышесказанного может быть достигнуто, если будет осуществлена следующая последовательность действий.

1. Современное состояние управления отходами требует принятия концептуальных решений. Одно из них — применение системы барьеров при строительстве полигонов ТКО, которая может сократить расходы и обеспечить оптимальные условия изоляции отходов.

2. Представленные выше рекомендации по классификации и устройству мультибарьеров на полигонах ТКО, обеспечивающих их безопасность для окружающей среды, разработаны с использованием опыта зарубежных стран. Необходимо внедрять методы применения барьеров безопасности в отечественную практику их проектирования.

3. Исходя из того, сколько и каких барьеров предполагается использовать при проектировании полигонов ТКО, столько необходимо разработать соответствующих рекомендаций и методик.

4. Созданные рекомендации и методики должны получить подтверждение и развитие в нормативных документах, разработка которых еще предстоит.

5. Исключительно национальным достижением российской науки является разработка учения о геохимических барьерах, позволяющего сократить затраты на обустройство полигонов ТКО, разработка которого должна быть продолжена.

6. Предлагаются варианты применения геохимических барьеров, использованных при проектировании природоохранных установок, получивших положительные результаты при проектировании полигонов ТКО.

7. Необходимы разработка и внедрение новых природных, искусственных и смешанных барьеров, направленных на нейтрализацию и локализацию

свалочных масс, особенно химической, геохимической и биогеохимической направленности.

8. Широкое использование имеющегося в настоящее время опыта нейтрализации опасных отходов металлургической и горнодобывающей промышленности может быть использовано для нейтрализации негативного воздействия полигонов ТКО на геологическую среду.

9. В основе применения указанных выше методов разработки барьеров безопасности при проектировании и строительстве полигонов ТКО должно лежать понимание особенностей геологического строения и других природных особенностей территорий, в частности зональных, геодинамических, гидрогеологических, природоохранных и др.

Исследования проведены в ходе выполнения проекта по гранту РНФ (проект № 22-17-00045).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.А., Алексеев А.П. Геохимические барьеры. М.: Логос, 2003. 143 с.
2. Бозуш А.А., Трофимов А.Н. Применение торфо-гуминовых веществ для снижения техногенного влияния отходов на окружающую среду. Химическая промышленность, 2005. №3. С. 153–158.
3. Воронкевич С.Д. Основы технической мелиорации грунтов. М.: Научный мир, 2005. 504 с.
4. ГОСТ Р 54145-2010. Менеджмент рисков. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Общая методология. М.: Стандартинформ, 2012.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска. М.: Стандартинформ, 2012.
6. ГОСТ Р 54141-2010. Менеджмент рисков. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Эталонные сценарии инцидентов. М.: Стандартинформ, 2012.
7. Грунтоведение: учеб. для студентов вузов, обучающихся по геол. специальностям. М.: Изд-во МГУ, 2005, 1023 с.
8. Жуков И.С. Барьеры безопасности: понятие, классификация, концепции. <https://www.safety.ru/sites/default/files/2017-5-49-56.pdf>
9. Лесин Ю.В. Фильтры для очистки воды из крупнокусковых отходов угледобычи // Уголь. 1986. № 2. С. 43–44.
10. Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах: рук. по безопасности. Приказ Ростехнадзора от 11 апр. 2016 г. № 144. Сер. 27. Вып. 16. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. 53 с.
11. Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности: приказ Ростехнадзора от 15.07.2013 г. № 306. Сер. 03. Вып. 73. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. 11 с.
12. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1966. 392 с.

13. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 367 с.
14. Фисун Н.В. Экологический потенциал эколого-гидрогеологических систем в зоне влияния Кучинского полигона твердых бытовых отходов (Московская область) // Геология и разведка. 2018. №3. С. 58–63.
15. Delvosalle C., Fievez C., Pipart A. Accidental Risk Assessment Methodology For Industries in the context of the Seveso II directive. Deliverable D.1C. WP1. Mons: Major Risk Research Centre, 2004.
16. Hollnagel E. Accident Analysis and barrier functions. Halden: Institute for Energy Technology, 1999.
17. Trbojevic V.M. Optimising hazard management by workforce engagement and supervision. Liverpool: Health and safety executive, 2008.

SAFETY BARRIERS AND THEIR USE IN DESIGN OF MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS

V. G. Zaikanov^a, I. N. Zaikanova^{a,#}

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*

[#]*E-mail: izaikanova@yandex.ru*

The article discusses the conceptual framework and the possibility of using safety barriers in the design of MSW landfills. Their existing classifications are evaluated, as well as the experience of their application at present. The article presents the safety concept based on a systematic description of various types of barriers (multi-barriers) using the example of barriers for MSW landfills. The international experience in using safety barriers, as well as their application in the design of MSW landfills in Russia, is considered. It is proposed to use on a wide scale the doctrine of geochemical barriers, which is an achievement of the Russian science. Options are considered for creating artificial geochemical barriers that have proven to be effective in neutralizing hazardous waste from the metallurgical and mining industries, allowing us to increase the effectiveness of geoenvironment protection and to reduce the cost of arranging landfills. A schematic diagram of the expected hazard assessment method, the so-called “bow tie” method is presented and the possibility of its application for assessing the risks of environmental impact on the landfill and the landfill on the geological environment is considered.

Keywords: *barrier, safety, landfill, solid municipal waste*

REFERENCES

1. Alekseenko, V.A., Alekseenko, A.P. [Geochemical barriers]. Moscow, Logos Publ., 2003, 143 p. (in Russian)
2. Bogush, A.A., Trofimov, A.N. [Application of peat-humic substances to reduce the technogenic impact of waste on the environment]. *Khimicheskaya promyshlennost'*, 2005, no. 3, pp. 153–158. (in Russian)
3. Voronkevich, S.D. [Fundamentals of ground technological amelioration]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2005, 504 p. (in Russian)
4. GOST R 54145-2010. [Risk management. Guidelines for the application of organizational safety measures and risk assessment. General methodology]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. (in Russian)
5. GOST R ISO/IEC 31010-2011. [Risk management. Risk assessment methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. (in Russian)
6. GOST R 54141-2010. [Risk management. Guidelines for the application of organizational safety measures and risk assessment. Reference incident scenarios]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. (in Russian)
7. [Soil and rock engineering: textbook for university students studying in geological specialties]. Moscow, MGU Publ., 2005, 1023 p. (in Russian)
8. Zhukov, I.S. [Safety barriers: concept, classification, concepts] <https://www.safety.ru/sites/default/files/2017-5-49-56.pdf> (in Russian)
9. Lesin, Yu.V. [Filters for water purification from large-piece coal mining waste]. *Ugol'*, 1986, no. 2, pp. 43–44. (in Russian)
10. [Methodological principles for conducting hazard analysis and accident risk assessment at hazardous industrial facilities: Safety manual]. Order of Rostekhnadzor, dated April 11, 2016, no. 144, series 27, issue 16. Moscow, ZAO NTC PB, 2016. 53 p. (in Russian)
11. [General requirements for safety justification of a hazardous industrial facility: federal norms and rules in the field of industrial safety]. Order of Rostekhnadzor, dated July 15, 2013, no. 306, series 03, issue 73. Moscow, ZAO NTC PB, 2013. 11 p. (in Russian)
12. Perelman, A.I. [Landscape geochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1966, 392 p. (in Russian)
13. Solntseva, N.P. [Oil production and geochemistry of natural landscapes]. Moscow, MGU Publ., 1998, 367 p. (in Russian)
14. Fisun, N.V. [Ecological potential of ecological hydrogeological systems in the zone of influence of the Kuchino solid municipal waste landfill (Moscow region)]. *Geologiya i razvedka*, 2018, no. 3, pp. 58–63. (in Russian)
15. Delvosalle, C., Fievez, C., Pipart, A. Accidental risk assessment methodology for industries in the context of the Seveso II directive. Deliverable D.1C. WP1. Mons, Major Risk Research Centre, 2004.
16. Hollnagel, E. Accident analysis and barrier functions. Halden, Institute for Energy Technology, 1999.
17. Trbojevic, V.M. Optimizing hazard management by workforce engagement and supervision. Liverpool, Health and safety executive, 2008.

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 628.472.35

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ, ПРОШЕДШИХ СТАДИЮ КОМПОСТИРОВАНИЯ

© 2025 г. Е. С. Соломатина^{1,*}, Г. А. Зарницын¹, Т. В. Маликова¹

¹Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: baira-lala@mail.ru

Поступила в редакцию 24.10.2024 г.

После доработки 20.11.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

В статье представлены результаты лабораторных исследований грунтов, полученных при компостировании пищевых и органических отходов. При исследовании рассматривались две валовые пробы грунта, отобранные в мае 2024 г. на комплексе по переработке твердых коммунальных отходов в Московской области. Основная цель — изучение свойств грунта и морфологии твердых частиц после его компостирования. В лабораторных условиях проведено определение естественной влажности грунта, плотности твердых частиц, содержания органических веществ, изучение частиц грунта под бинокуляром.

Ключевые слова: полигон ТКО, компостирование, физические свойства органических отходов, органическая составляющая, плотность твердых частиц техногрунта, гранулометрический состав, форма частиц

DOI: 10.31857/S0869780925020068 EDN: EPZDUG

ВВЕДЕНИЕ

Формирование и накопление твердых коммунальных отходов (ТКО) является общемировой социальной, экономической и экологической проблемой. Увеличение доли городского населения, рост крупных агломераций, изменение структуры сельского хозяйства в сторону автоматизации, экономический и технологический рост стран приводят не только к росту общего объема коммунальных отходов, но и к изменению их морфологии. Переход к одноразовым изделиям в медицине, общественном питании, быту и других сферах человеческой жизни, широкое распространение полимерных материалов еще более увеличивает количество мусора [2]. По оценкам ООН, объем отходов с начала 1990-х к 2025 г. возрос в 4–5 раз. Так, если в 1950-е годы в мире производилось около 5 млн т. пластиковых материалов, то сейчас — около 100 млн т [1]. В некоторых странах потенциальным решением проблемы складирования и хранения отходов является отправление отходов на вторичную переработку [4]. Несмотря на это, проблема с уже ранее накопленными в течение десятилетий отходами, представляющими собой серьезную угрозу для окружающей среды и здоровья населения, продолжает быть актуальной [5].

В Европе широко используются переработка, компостирование и сжигание мусора с восстановлением энергии. Значительные инвестиции направлены на развитие переработки и технологий WTE (Waste-to-Energy). В США более 50% отходов захоранивается, остальная часть перерабатывается или утилизируется через сжигание с восстановлением энергии. Азия сталкивается с серьезными проблемами в управлении отходами: распространены небезопасные практики, такие как открытое захоронение и сжигание. Развитые страны, например, Япония и Южная Корея, активно используют переработку и технологии WTE [3]. В России преобладает захоронение отходов, при этом начиная с 2019 г. предъявляются строгие требования к сортировке и переработке ТКО. Государственными стандартами уставлено требование к утилизации органических отходов с помощью компостирования. Техногрунт, получаемый после такой обработки, используют в качестве пересыпки отходов при складировании.

Таким образом, в России на текущий момент сформировались два типа полигонов ТКО: “старые”, где отсыпка отходов велась хаотично, и “новые” с выраженным слоистым строением.

Для проектирования и прогноза сценария функционирования “новых” полигонов необходимы сведения о свойствах, строении и типах техногрунтов, используемых в качестве пересыпки.

СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ КОМПСТИРОВАНИЯ

Оптимальный способ обращения с органическими и пищевыми отходами, содержащимися в ТКО, — утилизация методом компстирования. В современной практике наибольшее распространение получила утилизация органических компонентов ТКО методами аэробного компстирования. В процессе компстирования органические отходы проходят несколько фаз аэробной ферментации и вызревания с получением стабилизированного “зрелого компоста”.

Отходы укладываются в бурты в закрытых бетонных ваннах. Система закрытого компстирования в ваннах включает установку по аэрации компстируемого сырья как необходимый конструктивный элемент для ускоренного разложения органических веществ. В нижней части ванны установлен аэрационный пол для подачи воздуха под избыточным давлением, технологически совмещенный с системой канализации, обеспечивающей удаление стоков (фильтрата), образующегося в процессе компстирования. Для аэрации используется вентилятор среднего давления, подающий атмосферный воздух через интегрированные в пол площадку аэрационные каналы непосредственно внутрь бурта, т.е. в компстируемый материал.

Контроль процесса компстирования осуществляется по следующим параметрам: влажность,

концентрация кислорода, температура, парциальное давление кислорода. Изоляция процесса и исключение выбросов и сбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, достижения параметров регулируемого аэробного процесса достигается путем применения изолирующего материала — полупроницаемой мембраны. Мембрана обеспечивает проницаемость для воздуха (в том числе CO_2) и паров воды, исключая выбросы в окружающую среду углеводородов, микроскопической пыли и бактерий.

Для дальнейшего использования полученный продукт на типовых объектах компстирования просеивают на барабанном грохоте для отделения инородных крупных включений. Результатом данной обработки является производство техногрунта, пригодного для использования только в качестве изолирующего материала для полигонов ТКО.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

Для исследования в мае 2024 г. были отобраны две валовые пробы на комплексе по переработке твердых коммунальных отходов в Московской области. Первая проба прошла этап компстирования зимой и пролежала в отвале до мая (рис. 1а). Вторая проба отобрана непосредственно после этапа компстирования и грохочения (рис. 1б). Наименование и характеристика отобранных проб приведены в табл. 1.

В лабораторных условиях определены естественная влажность техногрунта и плотность твердых частиц (рис. 2а), содержание органических веществ и крупнообломочной фракции (рис. 2б), а также проведено изучение частиц техногрунта под биноклем.



Рис. 1. Фотографии отобранных проб: а – проба 1, б – проба 2.

Таблица 1. Характеристика отобранных проб техногрунта

Наименование пробы	Характеристика пробы
Проба 1	Этап компостирования пройден зимой, проба отобрана до процесса грохочения
Проба 2	Этап компостирования пройден весной, проба отобрана после процесса грохочения



Рис. 2. Определение: плотности твердых частиц (а) и содержания крупнообломочной фракции ситовым методом (б).

Определения физических свойств грунтов выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 5180-2015. Определение естественной влажности W_e осуществлялось методом высушивания до постоянной массы, плотности твердых частиц ρ_s — пикнометрическим методом, содержания органических веществ — методом прокаливания.

При визуальном анализе установлено преобладание в грунтах песчаной фракции. В связи с этим определение содержания крупнообломочной фракции осуществлялось ситовым методом согласно ГОСТ 12536-2014. Определение содержания проводилось для частиц диаметром >10.0 мм, 10.0 – 5.0 мм, 5.0 – 2.0 мм, 2.0 – 1.0 мм и <1.0 мм. Определение содержания более мелких частиц не осуществлялось в связи с разрушением мелких частиц грунта при интенсивном механическом воздействии.

Метод оптической микроскопии применялся с целью изучения формы, размера частиц, а также для получения сведений о соотношении частиц различного размера в техногрунтах, отобранных до и после процесса грохочения. Исследование частиц грунта под бинокулярным микроскопом Levenhuk DTX 500 LCD проводилось с увеличением до $\times 500$, но в основном частицы грунта до и после грохочения из-за их неоднородности и асимметричности анализировались при увеличении $\times 10$.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно результатам определения содержания крупнообломочной фракции, в пробе 1 преобладают фракции размером <1.0 мм. В пробе 2 более половины частиц имеют размер от 2.0 до 5.0 мм, и также закономерно выше содержание органических веществ, которые снижают показатели плотности частиц грунта (табл. 2).

В пробе 1 крупная фракция представлена осколками стекла, обломками пластика, щебнем, кусками строительного мусора, остатками древесины и перегноя (рис. 3а). В пробе 2 крупная фракция более однородная, в основном представлена остатками древесины и перегноя, а остальные компоненты содержатся в значительно меньшем количестве (рис. 3б).

Для лучшего визуального наблюдения морфологии частиц при дальнейшем исследовании использовались грунты без учета частиц диаметром >2 мм при увеличении $\times 10$.

Частицы грунта в пробе 1 характеризуются высокой степенью асимметричности и неоднородностью по морфологии (рис. 4). Наблюдается шарообразная, пластинчатая и удлиненная форма частиц. Шарообразная форма встречается наиболее часто и характерна для минеральных частиц, вероятно, с органической пленкой на поверхности

Таблица 2. Результаты лабораторных исследований грунтов

Наименование пробы	Содержание частиц различного размера, %					Естественная влажность грунта, %	Плотность частиц грунта, г/см ³	Потери при прокаливании, %
	>10.0 мм	10.0–5.0 мм	5.0–2.0 мм	2.0–1.0 мм	<1.0 мм			
проба 1	1.2	15.8	15.3	13.6	54.1	74	2.15	27.5
проба 2	0.0	10.6	53.3	17.1	18.9	38	1.91	41.1

(а)



(б)



Рис. 3. Фотографии крупных фракций после проведения гранулометрического анализа: а – проба 1, б — проба 2.

либо для микроагрегатов, состоящих из частиц с органическим цементом. Пластинчатой формой обладают частицы стекла и пластика. Удлиненная форма частиц встречается наиболее редко и характерна для растительных остатков — веток, корней растений. Размер частиц разнообразен и связан с формой рассматриваемых частиц. Диаметр наблюдаемых шарообразных частиц варьирует от 0.1 до 1 см, средняя длина пластинчатых частиц составляет от 0.05 до 1 см, ширина — от 0.05 до 0.5 см, удлиненные частицы имеют длину до 2 см и ширину до 0.1 см. Таким образом, в образце грунта, не прошедшем стадию грохочения, преобладающими являются шарообразные частицы (около 57% от общего количества частиц). Реже встречаются частицы пластинчатой (около 37%) и удлиненной (около 6%) формы. Средний эквивалентный диаметр частиц составляет 0.07–0.8 см.

Частицы грунта в пробе 2 также неоднородны, но в меньшей степени по сравнению с частицами грунта в первой пробе (рис. 5). Преобладающая форма частиц — пластинчатая, характерная как для частиц стекла и пластика, так и для минеральных зерен с органическим веществом на поверхности. Преобладание такой формы, ве-

роятно, объясняется разрушением микроагрегатов шарообразной формы в процессе грохочения, следовательно, песчаные частицы приобретают форму, наиболее приближенную к истинной. Шарообразные песчаные частицы и удлиненные, представленные растительными остатками, также встречаются, но в меньшей степени. Длина пластинчатых частиц варьирует от 0.1 до 1.2 см, ширина — от 0.1 до 0.6 см, диаметр шарообразных частиц составляет 0.2–0.8 см, удлиненные частицы имеют длину до 2 см и ширину до 0.4 см. Таким образом, в образце грунта после процесса грохочения преобладают пластинчатые частицы (около 62% от общего количества частиц), представленные стеклом, пластиком. Реже встречаются частицы шарообразной (около 31%) и удлиненной (около 7%) формы. Средний эквивалентный диаметр частиц составляет 0.1–0.9 см.

По результатам морфологического анализа установлено, что частицы грунта до процесса грохочения характеризуются более шарообразной формой, после процесса грохочения — более пластинчатой. Сходство грунтов обоих типов заключается в том, что все частицы достаточно неоднородны по своему составу и морфологии. При этом

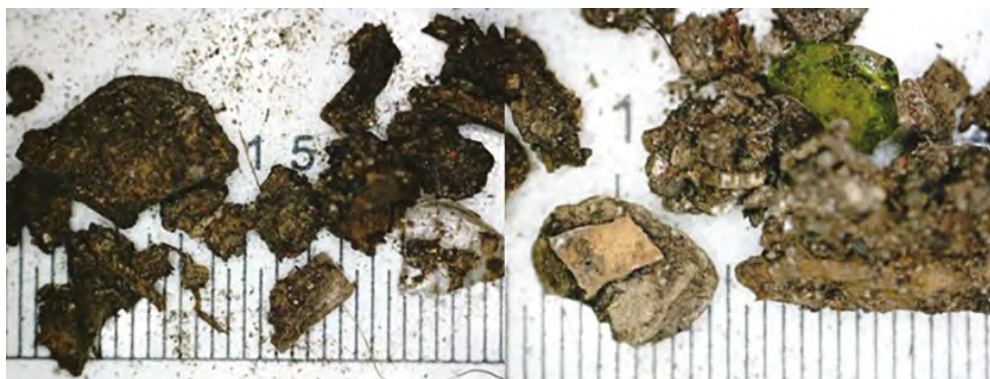


Рис. 4. Проба 1 под бинокляром (цена деления — 0.05 см).

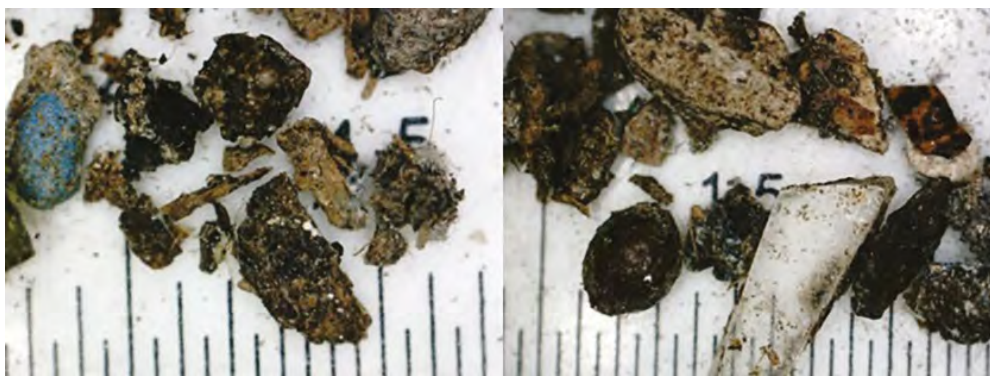


Рис. 5. Проба 2 под бинокляром (цена деления — 0.05 см).

средние размеры частиц также близки. Следовательно, основное различие между техногрунтами (пробами 1 и 2) заключается в процентном содержании частиц различной формы и размера, что связано с разрушением крупных микроагрегатов в результате процесса грохочения.

ВЫВОДЫ

В ходе работы исследованы два типа техногрунта, отобранные из ванн компостирования: прошедшие только стадию компостирования и прошедшие и стадию грохочения.

Техногрунт, прошедший только стадию компостирования, представляет собой песок гравелистый, наполовину содержащий фракции размером менее 1 мм, с относительно невысоким значением плотности частиц (2.15 г/см^3) и содержанием органических веществ 27.5%. В целом морфологический состав такого грунта достаточно неоднороден и представлен обломками стекла, пластика, остатками древесины и перегноя. Во фракциях $<2.0 \text{ мм}$ преобладают частицы шарообразной формы, характерной для минеральных частиц и микроагрегатов, состоящих из частиц с органическим цементом.

Техногрунт, претерпевший и компостирование, и грохочение, более однородный и представляет собой дресвяный грунт с преобладающей фракцией

размером от 2 до 5 мм, с невысоким значением плотности частиц (1.91 г/см^3) и содержанием органических веществ 41.1%. Его морфологический состав более однородный и в основном представлен остатками перегноя и древесины, а стекла и пластика значительно меньше. Частицы фракции $<2 \text{ мм}$ характеризуются в основном пластинчатой формой за счет разрушения шарообразных микроагрегатов в процессе грохочения.

Полученные результаты позволяют составить общее представление о типе и особенностях строения техногрунта, образующегося в ходе компостирования органических отходов. Также эти результаты могут быть использованы при изучении физико-механических свойств техногрунтов и оценки напряженно-деформированного состояния тела свалки в процессе эксплуатации и после ее рекультивации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-27-00364.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашихмина Т.В. Геоэкологический анализ состояния окружающей среды и природоохранные рекомендации в районе расположения полигонов ТБО Воронежской области: дис. ...канд. географ. наук. Воронеж, 2014. 122 с.

- <https://www.dissercat.com/content/geoekologicheskii-analiz-sostoyaniya-okruzhayushchei-sredy-i-prirodookhrannye-rekomendatsii->
2. Eurostat, 2002. Material use in the European Union 1980–2000: indicators and analysis. Statistical Office of the European Union, Luxembourg, 2001. 241 pp.
 3. Islam M.S., Sultana A., Rasheduzzaman M. et al. Assessment of the present state and economical prospects of solid waste at Amin Bazar waste dumping site, Dhaka, Bangladesh // Journal of Scientific Reseach. 2015. V. 7. № 3. P. 129–137. <https://doi.org/10.3329/jsr.v7i3.23415>
 4. Kannan D., Khademolqorani Sh. et al. Alavi. Smart waste management 4.0: The transition from a systematic review to an integrated framework // Waste Management. 2024. № 174. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.041>
 5. Laner D. et al. A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills // Waste Management. 2012. № 32. C. 498–512. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.010>

LABORATORY STUDIES OF PHYSICAL PROPERTIES OF PRE-COMPOSTED ORGANIC WASTE

E. S. Solomatina^{a, #}, G. A. Zarnitsyn^a, T. V. Malikova^a

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, bld.2, Moscow, 101000 Russia*

[#]*E-mail: baira-lala@mail.ru*

The article presents the results of laboratory studies of soils obtained during composting of food and organic waste. The study considered two bulk soil samples collected in May 2024 at a municipal solid waste processing complex in the Moscow region. The main objective is to study the soil properties and the morphology of solid particles after soil composting. The natural soil moisture, solid particle density, and organic matter content were determined in laboratory, and soil particle morphology was studied with a binocular microscope.

Keywords: *municipal solid waste landfill, composting, physical properties of organic waste, organic component, solid particle density of technogenic soil, particle-size distribution, particle shape*

REFERENCES

1. Ashikhmina, T.V. [Geoecological analysis of the environment and nature-conservation recommendations in the area of allocation MSW landfills in Voronezh region]. Cand.Sci. (Geogr.) Dissertation, Voronezh, 2014, 122 p. (in Russian)
2. Eurostat, 2002. Material use in the European Union 1980–2000: indicators and analysis. Statistical Office of the European Union, Luxembourg, 2001, 241 pp.
3. Islam, M.S., Sultana, A., Rasheduzzaman, M. et al. Assessment of the present state and economical prospects of solid waste at Amin Bazar waste dumping site, Dhaka, Bangladesh. *Journal of Scientific Reseach*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 129–137. <https://doi.org/10.3329/jsr.v7i3.23415>
4. Kannan, D., Khademolqorani, Sh. et al. Smart waste management 4.0: The transition from a systematic review to an integrated framework. *Waste Management*, 2024, no. 174, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.041>
5. Laner, D. et al. A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills. *Waste Management*, 2012, no. 32, pp. 498–512. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.010>

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 550.362

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГОРОДСКИХ РЫХЛЫХ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ПОКРЫТИЙ

© 2025 г. Д. Ю. Демежко^{1,*}, Н. Р. Факаева¹, А. А. Горностаева¹, Б. Д. Хацкевич¹

¹Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
ул. Амундсена 100, Екатеринбург, 620016 Россия

*E-mail: ddem54@inbox.ru

Поступила в редакцию 03.02.2025 г.

После доработки 06.02.2025 г.

Принята к публикации 21.04.2025 г.

Методом игольчатого зонда исследована теплопроводность проб некоторых рыхлых приповерхностных отложений и покрытий в Екатеринбурге, в том числе глинисто-дресвянистых кор выветривания гранитов и ультраосновных пород, гранитного отсева, кварцевого песка, а также дробленого пьезокварца. Одновременно исследовались влажность и гранулометрический состав. При увеличении влажности от 2–3% до 20–25% теплопроводность возрастает от 0.18–0.3 до 1.2–2.0 Вт·м⁻¹·К⁻¹. Для многих проб характерна S-образная зависимость теплопроводности от влажности, включающая начальный участок медленного роста теплопроводности, участок более быстрого роста и выполаживание зависимости при приближении к максимальному насыщению. Полученные экспериментальные данные аппроксимированы с помощью соотношения, использующего приближение эффективной среды на основе теории перколяции (percolation-based effective medium approximation — P-EMA). Погрешность аппроксимации составила 0.08–0.26 Вт·м⁻¹·К⁻¹. Параметр “критическая влажность” в приближении P-EMA определяет положение перегиба кривой. Установлено, что критическая влажность увеличивается с ростом содержания наиболее мелкодисперсных фракций — глинистых и пылеватых. Данные о теплопроводности рыхлых приповерхностных отложений могут быть полезны при расчетах теплообмена на городских поверхностях, например, в рамках исследований городского острова тепла.

Ключевые слова: *рыхлые приповерхностные отложения, теплопроводность, влажность, гранулометрический состав, перколяция*

DOI: 10.31857/S0869780925020071 EDN: EPZEGJ

ВВЕДЕНИЕ

Тепловой баланс между атмосферой и земной поверхностью, во многом определяющий региональный и локальный климат [4, 6, 9, 10], зависит от тепловых свойств природных или искусственных материалов, слагающих земную поверхность. Города, значительную часть площадей которых занимают твердые искусственные покрытия (асфальт, бетон), формируют свой микроклимат, известный как феномен городского острова тепла [4, 10]. Тепловые свойства твердых искусственных покровов хорошо изучены и широко используются при моделировании городских островов [6, 3, 9]. Менее изучены рыхлые приповерхностные отложения — почвы, неконсолидированные осадочные породы, коры выветривания коренных пород,

песчано-гравийные покрытия парковых дорожек, хотя они занимают значительную часть территории городов, их окраин и новостроек. И даже будучи перекрыты искусственными материалами, они участвуют в городском теплообмене, поскольку суточная температурная волна распространяется до 30–50 см на глубину, а годовая — до 15–20 м [2]. В отличие от твердых влагонепроницаемых материалов их тепловые свойства сильно меняются в зависимости от влагонасыщенности и фазового состояния воды.

Цель работы — экспериментальное исследование теплопроводности рыхлых приповерхностных отложений и покрытий, широко представленных в городской среде Екатеринбурга, рассмотрение

теоретических зависимостей для аппроксимации экспериментальных данных.

Екатеринбург расположен на восточном склоне Уральского хребта, на рубеже восточных предгорий Среднего Урала и Зауральской складчатой возвышенности. Породы коренной основы представлены палеозойскими вулканогенными, вулканогенно-осадочными и метаморфическими комплексами основного состава. Широко развиты интрузивные массивы: габбровой и гранитоидной формаций. Коренные породы в пределах города иногда выходят на поверхность, но в основном перекрыты отложениями различных генетических типов. Ведущая роль среди приповерхностных образований принадлежит корам физического и химического выветривания [1]. Мощность кор выветривания колеблется от первых до десятков метров. Маломощный (5–10 см) дерновый слой сохраняется в лесопарковых зонах и на газонах.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОТ ВЛАЖНОСТИ

Теплопроводность рыхлых отложений определяется сложным взаимодействием между структурами порового пространства и твердой матрицы. При этом, как показывает опыт многих исследователей, по мере увеличения содержания воды от сухой среды до полностью насыщенной теплопроводность возрастает.

В простейшем случае, когда среда состоит из двух компонент с различными свойствами (λ_1 и λ_2), ее эффективная теплопроводность при разных соотношениях компонент лежит в пределах между λ_1 и λ_2 . Сложнее оценить поведение кривой эффективной теплопроводности между этими крайними точками. Для среды, состоящей из параллельных пластин, если тепловой поток направлен перпендикулярно пластинам, эффективная теплопроводность равна среднему взвешенному гармоническому:

$$\lambda = [k / \lambda_1 + (1 - k) / \lambda_2]^{-1}, \quad (1)$$

где $0 < k < 1$ — доля первой компоненты, и среднему взвешенному арифметическому, если поток направлен параллельно пластинам:

$$\lambda = k\lambda_1 + (1 - k)\lambda_2. \quad (2)$$

При любой другой структуре среды зависимости будут сложнее. Среднее арифметическое ограничивает сверху диапазон возможных значений теплопроводности, среднее гармоническое — снизу (рис. 1).

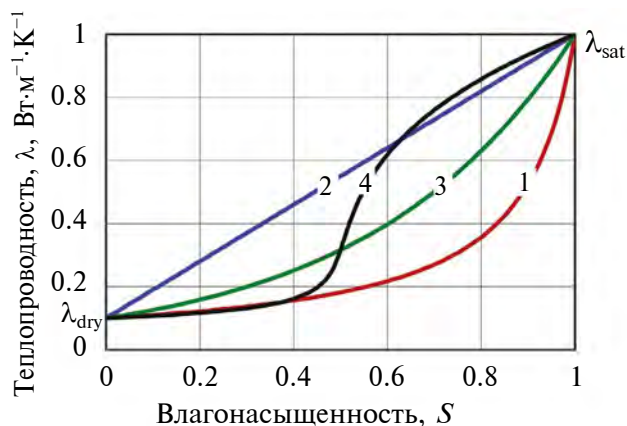


Рис. 1. Теоретические зависимости теплопроводности рыхлых материалов от влагонасыщенности. Номера кривых соответствуют номерам зависимостей (1–4).

Авторы [11] полагают, что среднее геометрическое:

$$\lambda = \lambda_1^k \lambda_2^{(1-k)}, \quad (3)$$

применимо как для сред с твердыми компонентами, в том числе с зернистой структурой, так и для пористых водонасыщенных сред. Sepaskhah and Boersma [12], исследовав теплопроводность образцов суглинков и супесей, обнаружили, что существует порог влагонасыщенности, ниже которого эффективная теплопроводность почти не зависит от содержания воды. Многие экспериментальные исследования позже подтвердили слабую зависимость теплопроводности от влажности при малых значениях последней для песчаных и глинистых грунтов. Был предложен ряд эмпирических и квазифизических моделей для описания влияния влагонасыщенности на теплопроводность пористых материалов, но большинство этих моделей хорошо согласуется с эмпирическими данными выше некоторого порога влагонасыщенности. Лишь некоторые, не имея физического обоснования, позволяли описать поведение всей кривой теплопроводности/влажность (например, [7, 8]). Ghanbarian and Daigle [5], рассмотрев большое число таких моделей, предложили аппроксимирующие зависимости, использующие приближения эффективной среды на основе теории перколяции (percolation-based effective medium approximation — P-EMA). Концепция критической объемной доли хорошо известна как порог перколяции в рамках теории перколяции (просачивания).

Рассмотрим несколько упрощенно проявление эффекта перколяции применительно к нашему случаю трехкомпонентной среды, включающей высокотеплопроводные минеральные зерна, воду и воздух с очень низкой теплопроводностью.

Теплопроводность сухой породы обусловлена большим количеством воздуха в порах и плохими тепловыми контактами между зернами. Добавление в такую среду небольшого количества воды улучшает тепловые контакты между зернами, образуя конечные проводящие кластеры. Однако между кластерами остаются пустоты/поры, в которых вода отсутствует, и эффективную теплопроводность определяют свойства низкотеплопроводной фазы. Эта часть зависимости описывается уравнением (1). С ростом содержания воды проводящие кластеры охватывают все большее пространство и в некоторый момент начинают пронизывать весь объем. Здесь происходит резкое увеличение эффективной теплопроводности. При дальнейшем увеличении содержания воды кривая выполаживается, поскольку вода имеет более низкую теплопроводность по сравнению с минеральным скелетом. Эта финальная часть зависимости описывается уравнением (2) (см. рис. 1).

Для аппроксимации эмпирических данных теплопроводность/влажность в [5] была предложена следующая зависимость:

$$W = \frac{(\lambda^{1/p} - \lambda_d^{1/p}) [W_c \lambda_s^{1/p} + (\phi - W_c) \lambda^{1/p}]}{(\lambda_s^{1/p} - \lambda_d^{1/p}) \lambda^{1/p}}, \quad (4)$$

где W — объемная влажность, равная отношению объема воды в пробе к объему пробы, W_c — критическая объемная влажность, $\lambda = \lambda(W)$ — эффективная теплопроводность, λ_d — теплопроводность сухого грунта (поры заполнены воздухом), λ_s — теплопроводность влажного грунта (поры полностью заполнены жидкостью), ϕ — коэффициент пористости, p — параметр масштабирования. Зависимости теплопроводности от объемной влажности, нормированной на пористость $\lambda(W/\phi)$, или от степени насыщения пор водой, $S = W/\phi$, приведены на рис. 2. Параметр масштабирования

p в соответствии с теорией перколяции задает степенной закон изменения $\lambda(W - W_c)$ вблизи порога перколяции W_c [5]. Иными словами, он определяет масштаб перехода от нижней предельной зависимости (1) к верхней (2). Критическая влагонасыщенность S_c (или влажность $W_c = S_c \phi$) отмечает начальную фазу более интенсивного изменения теплопроводности.

Зависимость (4) можно использовать и в том случае, когда вместо объемной влажности W измеряется массовая влажность W_m , равная отношению массы влаги к массе сухого вещества пробы $W_m = M_w/M_{dry}$. Между ними существует простое соотношение $W = W_m \cdot \rho_{dry}/\rho_w$, где ρ_{dry} и ρ_w — плотности сухой пробы и воды. В этом случае вместо коэффициента пористости используется показатель максимальной массовой влажности W_m^{max} (все поры заняты водой), а вместо критической объемной влажности — критическая массовая W_{mc} :

$$W_m = \frac{(\lambda^{1/p} - \lambda_d^{1/p}) [W_{mc} \lambda_s^{1/p} + (W_m^{max} - W_{mc}) \lambda^{1/p}]}{(\lambda_s^{1/p} - \lambda_d^{1/p}) \lambda^{1/p}}. \quad (5)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для измерений теплопроводности и влажности использовались пробы природного происхождения, а также искусственно полученные путем дробления горных пород. Проба дисперсного материала (4–6 кг) высушивалась при температуре 100–120°C. С помощью набора сит с ячейками 40, 20, 15, 10, 5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315 и 0.16 мм определялся гранулометрический состав пробы. Затем все компоненты ситового анализа перемешивались. Теплопроводность высушенной пробы в 5-литровом контейнере измерялась методом игольчатого зонда с помощью зондового устройства МИТ-1 (www.interpribor.ru) согласно

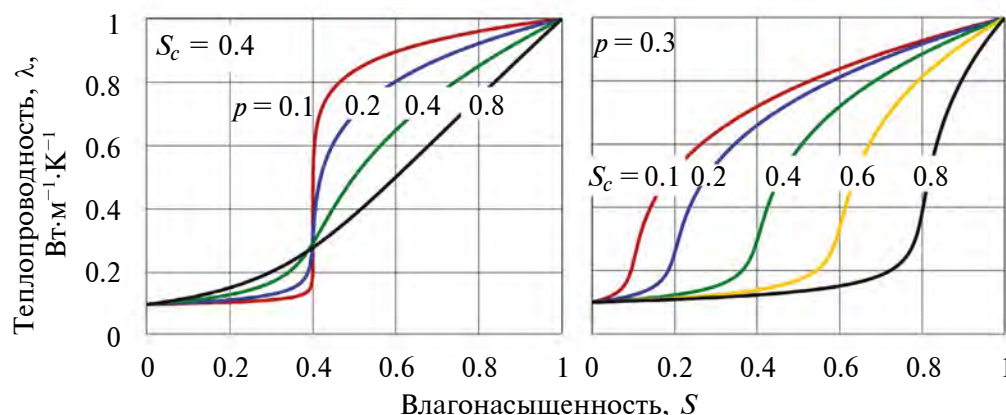


Рис. 2. Теоретические зависимости теплопроводности рыхлых материалов от влагонасыщенности в соответствии с (4) при различных параметрах масштабирования p и критической влагонасыщенности S_c .

ГОСТ 30256-94. Для определения массовой влажности использовался диэлькометрический зондовый влагомер ВИМС-2.21 (www.interpribor.ru). Затем в пробу добавлялась вода, материал тщательно перемешивался и отстаивался в течение нескольких часов. После чего проводился следующий цикл измерений. Влажность увеличивали до тех пор, пока не начинал увеличиваться объем пробы (набухание тонкодисперсных материалов), или пока свободная вода не появлялась над поверхностью пробы (крупнозернистые материалы). Выполнено 315 измерений для 10 проб. Параметры p и W_{mc} в уравнении (5) подбирались из условия минимизации среднеквадратической погрешности аппроксимации σ . Характеристики исследованных проб приведены в табл. 1, интегральные кривые гранулометрического состава — на рис. 3, зависимости теплопроводности от влажности и их аппроксимации в соответствии с (5) — на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Теплопроводность исследованных проб в диапазоне массовой влажности 2–25% лежит в пределах $0.18–2 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$. Для всех проб теплопроводность увеличивается с ростом влажности. Для многих характерен отмеченный выше участок слабой зависимости теплопроводности от влажности. Максимальное значение $W_{mc} = 17.5\%$ наблюдается у глинисто-дресвянистой коры выветривания габбро (проба №5), содержащей большую долю

мелких фракций (см. рис. 3). Еще больше таких фракций — в пробе гранитного отсева-II (№4), однако критическая влажность при этом ниже ($W_{mc} = 5.0\%$). Можно заметить, что кривая $\lambda(W_m)$ пробы №4 имеет два субгоризонтальных участка: первый — до 5.0%, второй — от 8 до 12%, а гистограмма гранулометрического состава — соответственно два максимума. Вероятно, крупные фракции определяют первое значение критической влажности ($W_{mc} = 5.0\%$), а наиболее мелкие — второе ($W_{mc} \approx 13\%$). Впрочем, это лишь качественное объяснение, поскольку влияния отдельных фракций не аддитивны. Минимальной критической влажностью ($W_{mc} \approx 2\%$) и, одновременно, минимальным значением параметра масштабирования ($p = 0.19$) характеризуется проба отсортированного дробленого пьезокварца (№6) с размерами частиц от 0.65 до 4 мм. Сами кристаллы пьезокварца обладают высокой теплопроводностью ($\lambda_{\parallel} = 9.5 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, $\lambda_{\perp} = 6.1 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$), но из-за плохих тепловых контактов между обломками теплопроводность сухой пробы мала ($\lambda = 0.19 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$). Поскольку кварц — гидрофильный минерал, то даже небольшое количество воды распределяется на контактах между обломками, резко уменьшая тепловое сопротивление и создавая обширные кластеры. Поэтому наблюдается быстрый рост теплопроводности пробы. Однако вскоре (при $W_{mc} > 5\%$) рост теплопроводности замедляется, поскольку теплопроводность воды намного ниже ($\lambda = 0.6 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$) теплопроводности скелета.

Таблица 1. Характеристики исследованных проб и параметры аппроксимации

№	Состав пробы	К-во измере- ний	Параметры аппроксимации					
			λ_d	λ_s	W_m^{max}	W_{mc}	p	σ
			Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹		%			Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹
1	Кварцевый песок	34	0.23	2.95	49	3.6	0.35	0.13
2	Отсев жильного кварца	28	0.18	2.06	47	2.5	0.26	0.26
3	Гранитный отсев-I	39	0.22	2.00	49	3.8	0.33	0.10
4	Гранитный отсев-II	31	0.21	2.15	50	5.0	0.40	0.10
5	Отсев пьезокварца	25	0.19	2.25	45	2.3	0.19	0.14
6	Глинисто-дресвянистая кора выветривания габбро	34	0.22	1.3	46	17.5	0.29	0.08
7	Кора выветривания гранитов-I	35	0.26	2.02	44	7.8	0.29	0.16
8	Кора выветривания гранитов-II	27	0.18	2.06	39	5.0	0.46	0.15
9	(№7+№8), фракция <2.5 мм	35	0.19	2.00	47	7.0	0.33	0.11
10	(№7+№8), фракция >2.5 мм	27	0.07	2.20	30	4.0	0.85	0.09

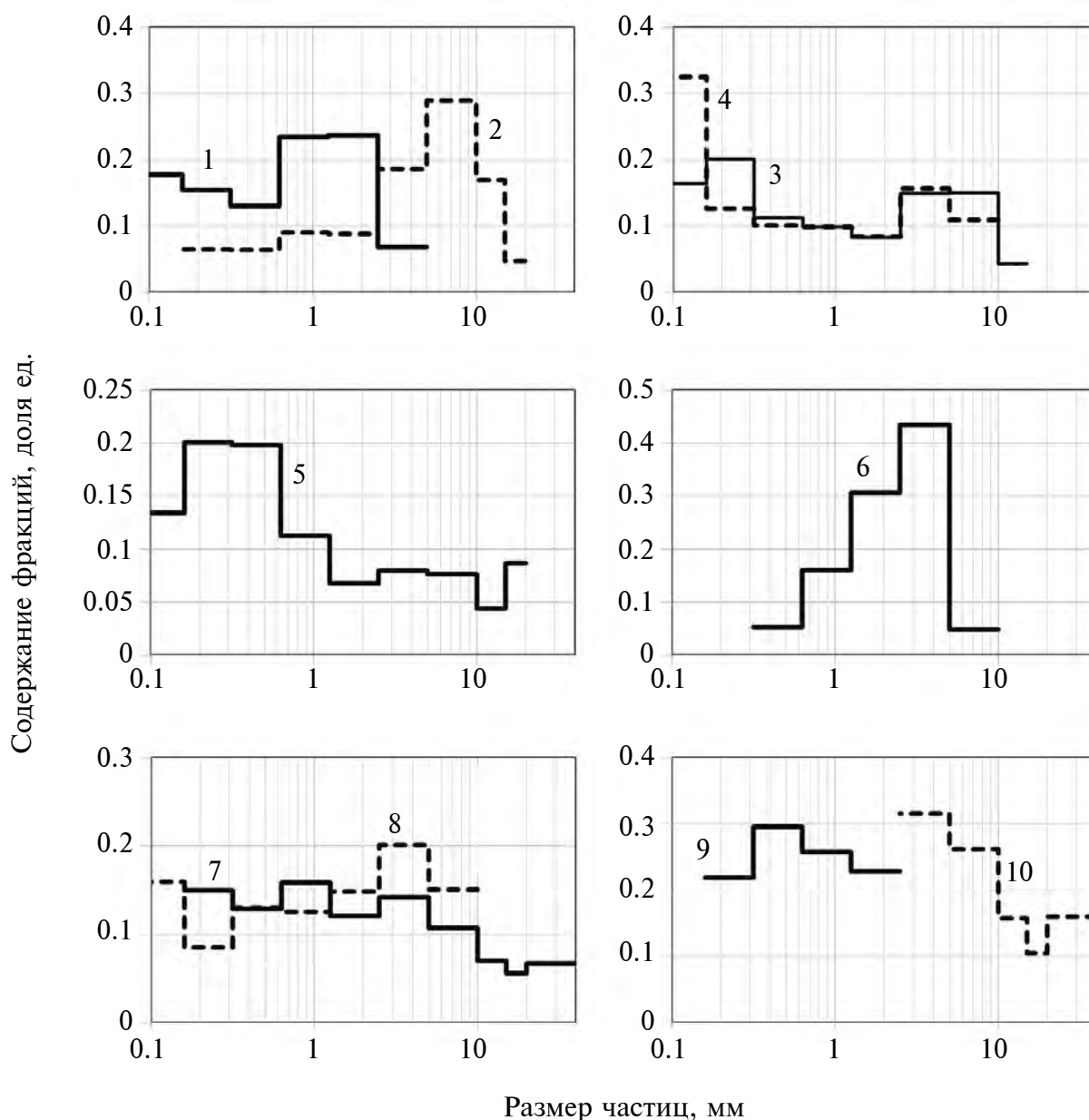


Рис. 3. Гранулометрический состав проб. Номера кривых соответствуют номерам проб в табл. 1.

Таким образом, критическая влажность W_{mc} растет с увеличением доли мелких фракций, в первую очередь глинистых. Этот вывод подтверждают и результаты измерений проб № 7–10. Критическая влажность исходных отобранных проб глинисто-дресвянистой коры выветривания гранитов (№ 7, 8) равнялась 7.8% и 5%. Объединенная проба была разделена на фракции <2.5 мм (№9) и >2.5 мм (№10). Критическая влажность фракции <2.5 мм сохранилась на уровне исходных проб (7%), а фракции >2.5 мм упала до 4%, а возможно, и ниже, поскольку перегиб на кривой $\lambda(W_m)$ практически незаметен (см. рис. 4). Поведение

масштабного параметра p не столь очевидно. Если для дробленого пьезокварца (№6), не содержащего мелких фракций, он минимален ($p = 0.19$), то для крупной фракции коры выветривания гранитов (№10) — максимален ($p = 0.85$). Возможно, этот параметр сложным образом зависит от структуры скелета, распределения минеральных зерен по крупности и теплопроводности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теплопроводность рыхлых приповерхностных отложений и покровов, характерных для г. Ека-

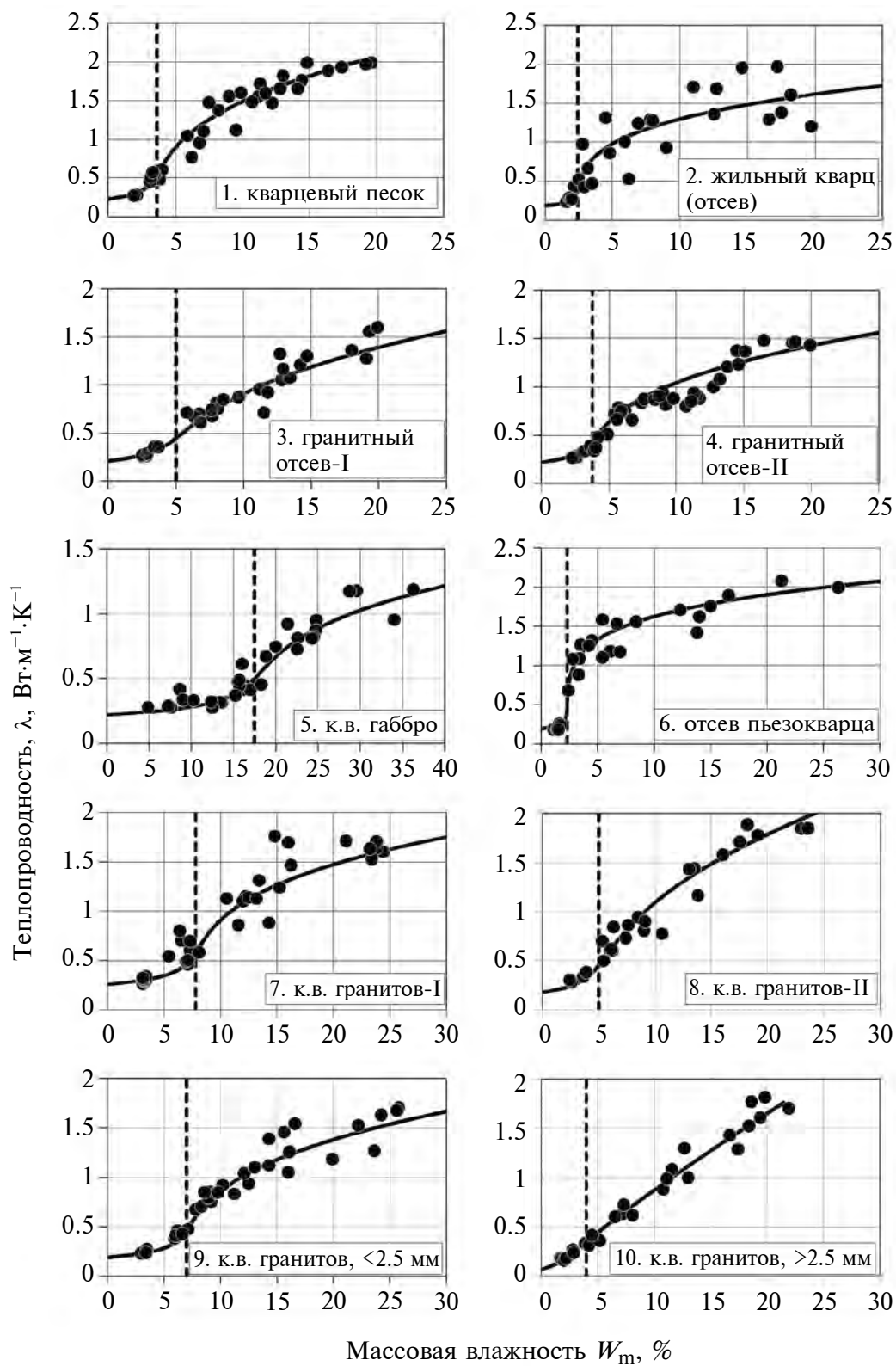


Рис. 4. Результаты измерений теплопроводности и массовой влажности проб (точки) и аппроксимирующие зависимости согласно соотношению (5).

теринбург, лежит в пределах $0.18\text{--}2 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$. Основной параметр, определяющий их теплопроводность, — влажность. С ростом влажности теплопроводность увеличивается. Для многих проб характерна S-образная зависимость $\lambda(W_m)$, включающая начальный участок медленного роста теплопроводности, участок более быстрого роста и выполаживание зависимости при приближении к максимальному насыщению.

Полученные экспериментальные данные аппроксимированы с помощью соотношения, использующего приближение эффективной среды на основе теории перколяции (percolation-based effective medium approximation — Р-ЕМА). Погрешность аппроксимации составила $0.08\text{--}0.26 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ (в среднем — $0.13 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$).

Данные о теплопроводности рыхлых городских приповерхностных отложений и покровов могут быть полезны при расчетах теплообмена, например, в рамках исследований городского острова тепла.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10018, <https://rscf.ru/project/22-77-10018/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грязнов О.Н., Гуляев А.Н., Рубан Н.В. и др. Факторы инженерно-геологических условий города Екатеринбурга // Известия Уральского государственного горного университета. 2015. № 3 (39). С. 5–20.
2. Демежко Д.Ю. Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2001. 144 с.
3. Alchapar N.L., Correa E.N., Cantón M.A. Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones // Energy and Buildings. 2014. № 69. P. 22–32.
4. Chandler T.J. The climate of towns, Ch. 14. Chandler T.J. and Gregory S. (eds.). The Climate of the British. Longman, London, 1976. P. 307–329.
5. Ghanbarian B., Daigle H. Thermal conductivity in porous media: Percolation-based effective-medium approximation // Water Resources Research. 2016. № 52 (1). P. 295–314.
6. Goward S.N. Thermal behavior of urban landscapes and the urban heat island // Physical Geography. 1981. № 2 (1). P. 19–33.
7. Lu S., Ren T., Gong Y., Horton R. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature // Soil Science Society of America Journal. 2007. V. 71. № 1. P. 8–14.
8. Lu N., Dong Y. Closed-form equation for thermal conductivity of unsaturated soils at room temperature // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2015. V. 141(6): 04015016.
9. Mohajerani A., Bakaric J., Jeffrey-Bailey T. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete // Journal of environmental management. 2017. V. 197. P. 522–538.
10. Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island // Quarterly journal of the royal meteorological society. 1982. V. 108 (455). P. 1–24.
11. Sass J.H., Lachenbruch A.H., Munroe R.J. Thermal conductivity of rocks from measurements on fragments and its application to heat-flow determinations // Journal of geophysical research. 1971. V. 76 (14). P. 3391–3401.
12. Sepaskhah A.R., Boersma L. Thermal conductivity of soils as a function of temperature and water content // Soil Science Society of America Journal. 1979. V. 43 (3). P. 439–444.

THERMAL CONDUCTIVITY OF LOOSE URBAN SOILS

D. Yu. Demezhko^{1,*}, N. R. Fakaeva¹, A. A. Gornostaeva¹, B. D. Khatskevich¹

¹*Bulashevich Institute of Geophysics, Urals Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Amundsena 100, Yekaterinburg, 620016 Russia*

^{*}*E-mail: ddem54@inbox.ru*

Thermal conductivity of some loose urban soils in Yekaterinburg has been studied using the needle probe method. The studied samples include weathering crusts of granitic and ultramafic rocks, quartz sand and crushed piezoelectric quartz. Humidity and granulometric composition have also been studied. An increase in humidity from 2–3% to 20–25% leads to an increase in thermal conductivity from 0.15–0.3 W m⁻¹ K⁻¹ to 1.2–2.0 W m⁻¹ K⁻¹. Most samples are characterized by an “S”-shaped dependence of thermal conductivity on humidity, including an initial section of slow growth in thermal conductivity, a section of a faster growth, and a flattening of the dependence as it approaches maximum saturation. For the analytical description of experimental data, the percolation-based effective medium approximation (P-EMA) was used. The approximation error was 0.08–0.26 W m⁻¹ K⁻¹. The “critical humidity” parameter in the P-EMA approximation determines the position of curve inflection. It has been established that the critical humidity increases with the growth of the finest fraction content, i.e., clay and silty loam. Data on the thermal conductivity of loose urban soils can be used in calculating heat exchange on urban surfaces, for example, in urban heat island studies.

Keywords: loose urban soils, thermal conductivity, humidity, granulometric composition, percolation

REFERENCES

1. Gryasnov, O.N., Gulyaev, A.N., Ruban, N.V., Savintsev, I.A., Cherkasov, S.A. [Factors of engineering geological conditions of Yekaterinburg]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 2015, no. 3 (39), pp. 5–20. (in Russian).
2. Demezhko, D.Yu. [Geothermal method for paleoclimate reconstruction (by the example of the Urals, Russia)]. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 2001, 144 pp. (in Russian).
3. Alchapar, N.L., Correa, E.N., Cantón, M.A. Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones. *Energy and Buildings*, 2014, no. 69, pp. 22–32.
4. Chandler, T.J. The climate of towns. Ch. 14. Chandler, T.J. and Gregory, S., Eds. *The Climate of the British*. London, Longman Publ., 1976, pp. 307–329.
5. Ghanbarian, B., Daigle, H. Thermal conductivity in porous media: Percolation-based effective-medium approximation. *Water Resources Research*, 2016, no. 52(1), pp. 295–314.
6. Goward, S.N. Thermal behavior of urban landscapes and the urban heat island. *Physical Geography*, 1981, no. 2(1), pp. 19–33.
7. Lu, S., Ren, T., Gong, Y., Horton, R., An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, vol. 71, no. 1, pp. 8–14.
8. Lu, N., Dong, Y. Closed-form equation for thermal conductivity of unsaturated soils at room temperature. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, vol. 141, no. 6, 04015016.
9. Mohajerani, A., Bakaric, J., Jeffrey-Bailey, T. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of environmental management*, 2017, vol. 197, pp. 522–538.
10. Oke, T.R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 1982, vol. 108, no. 455, pp. 1–24.
11. Sass, J.H., Lachenbruch, A.H., Munroe, R.J. Thermal conductivity of rocks from measurements on fragments and its application to heat-flow determinations. *Journal of geophysical research*, 1971, vol. 76, no. 14, pp. 3391–3401.
12. Sepaskhah, A.R., Boersma, L. Thermal conductivity of soils as a function of temperature and water content. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, vol. 43, no. 3, pp. 439–444.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 550.35: 614.876

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА РАДОНА В МОСКВЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

© 2025 г. С. Г. Гаврильев¹, Т. Б. Петрова^{2,*}, П. С. Микляев^{1,**}, Е. А. Карфидова¹

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический ф-т, кафедра радиохимии, Ленинские горы 1, стр. 3, ГСП-1, Москва, 119991 Россия

*E-mail: tbp111@inbox.ru

**E-mail: peterm7@inbox.ru

Поступила в редакцию 12.09.2024 г.

После доработки 17.11.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

При выполнении инженерных изысканий на строительных площадках г. Москва в ходе плановых измерений плотности потока радона (ППР) были обнаружены аномально высокие значения ППР, превышающие 400 мБк/(м²с) и достигающие >5000 мБк/(м²с). Причины выявленных аномалий до конца не ясны, так как на исследуемой территории нет активных тектонических разломов, считающихся каналами дегазации земной коры, или высоких концентраций урана и радия в геологической среде, достаточных для формирования подобных радоновых аномалий. В представленном исследовании использованы алгоритмы машинного обучения, чтобы попытаться найти ответ на вопрос о природе столь высоких значений ППР. Для прогнозирования аномалий ППР в масштабах города был использован алгоритм Random Forest. В качестве предикторов использовались данные крупномасштабного геологического картирования Москвы и радиационно-экологических изысканий на территории города. Данные для обучения включали результаты измерений ППР на 931 участке, из которых 112 были классифицированы как аномальные (ППР > 400 мБк/(м²с)). На основе полученных прогнозов выделены факторы, влияющие на ППР в фоновых и аномальных условиях. Анализ значимости предикторов показал, что наиболее важные факторы, обуславливающие фоновые значения ППР, — литологический тип грунта, концентрация в грунтах ²²⁶Ra и глубина залегания подземных вод. Аномальные значения ППР проявляют пространственную связь с геодинамически активными зонами, склонами крутизной более 8°, а также с техногенными факторами, такими как линии железных дорог, что, вероятно, обусловлено их вибрационным воздействием на грунт при движении поездов.

Ключевые слова: радон, машинное обучение, Random Forest, плотность потока радона, потенциальная радоноопасность, прогноз

DOI: 10.31857/S0869780925020085 EDN: EPZKGU

ВВЕДЕНИЕ

Радон — природный радиоактивный газ, образующийся в земной коре при распаде радия. В статье речь пойдет о наиболее распространенном и гигиенически значимом изотопе ²²²Rn, дочернем продукте ²²⁶Ra, входящем в цепочку распада ²³⁸U. Благодаря относительной распространенности урана в земной коре, радон всегда присутствует в газовой фазе грунтов и, выделяясь из грунтов, может накапливаться в зданиях в опасных концентрациях. Радон считается вторым по значимости

фактором риска развития рака легких после курения [25]. Наибольшую опасность представляет не столько сам радон, сколько его дочерние продукты распада (ДПР) — радиоактивные изотопы полония, свинца и висмута, осаждающиеся в легких. В связи с этим крайне важно контролировать концентрацию радона и его дочерних продуктов распада в помещениях.

Согласно рекомендациям Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) максимальная объемная активность радона в жи-

лых помещениях не должна превышать 300 Бк/м³ [11], что соответствует максимальной годовой дозе 10 мЗв. В Российской Федерации нормируется эквивалентная объемная активность (ЭРОА) радона — взвешенная сумма эквивалентных активностей основных дочерних продуктов радона в воздухе. Согласно требованиям Норм радиационной безопасности (НРБ-99/2009) ЭРОА радона в помещениях новых зданий не должна превышать 100 Бк/м³, для эксплуатируемых зданий — 200 Бк/м³. Кроме того, Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) регулируется плотность потока радона (ППР) с поверхности грунта на участках строительства, которая не должна превышать 80 мБк/(м²с) для жилых и общественных зданий, для производственных зданий — 250 мБк/(м²с). На участках, где ППР превышает указанные значения, в проекте зданий необходимо предусматривать противорадоновую защиту. За исключением относительно редких случаев, когда в ходе строительства зданий были использованы материалы с повышенной концентрацией природных радионуклидов, основным источником радона в зданиях являются грунты основания.

Известно, что наиболее важные условия, определяющие эксхалицию (выделение) радона с поверхности грунта, — содержание ²²⁶Ra в грунтах и проницаемость грунтов. Последняя, в свою очередь, зависит от пористости и влажности грунта, а также наличия трещин [16]. Кроме того, на эксхалицию радона влияют метеорологические факторы: температура воздуха и грунта, атмосферное давление, количество осадков [9, 14, 16, 24]. Радон, выделяясь из грунтов, может проникать в здания, где накапливается, как правило, на нижних этажах. Накопление радона в зданиях — сложный процесс, зависящий, кроме прочего, от особенностей конструкции здания, типа фундамента, износа конструкций подземной части, состояния врезок коммуникаций, системы вентиляции, типов оконных рам, этажности и многого другого, включая даже такие непредсказуемые факторы, как привычки жителей проветривать помещения [6]. В этой связи прогноз содержания радона в каждом здании очень сложен, однако можно выделить территории, на которых по геологическим условиям вероятность повышенного поступления радона в здания может быть высокой. Такая вероятность называется в отечественной практике потенциальной радоноопасностью территории. В мировой литературе аналогичный показатель называют Geogenic Radon Hazard Index (GRHI) [6]. Основными признаками потенциальной радоноопасности территории служат значения ППР, превышающие допустимый предел (80 мБк/(м²с)), а также повышенные значения концентрации радона в грунтовой газе или содержание (объемной

активности) ²²⁶Ra в грунтах в сочетании с их высокой проницаемостью.

Перенос радона в геологической среде осуществляется посредством молекулярной диффузии благодаря градиенту концентрации на границе литосферы и атмосферы, а также за счет адвективного переноса в потоках газа, формирующихся в крупных порах и трещинах за счет градиентов давления [7].

Плотность потока радона с поверхности грунта может быть оценена с использованием относительно простой формулы, являющейся решением дифференциального **уравнения диффузионного переноса** радона в пористой среде [24]:

$$J_D = C_{Ra} \lambda f \rho_s (1 - \varepsilon) L, \quad L = \sqrt{D_e / \lambda}, \quad (1)$$

где J_D — ППР с поверхности грунта, Бк/(м²с); C_{Ra} — удельная активность ²²⁶Ra в грунтах, Бк/кг; λ — постоянная распада ²²²Rn, 1/с; f — коэффициент эманирования (доля радона, выделяющаяся в поровое пространство), д.ед.; ρ_s — плотность частиц грунта, кг/м³, ε — пористость грунта, д.ед.; L — длина диффузии радона в грунте, м.

Диффузионный перенос радона непрерывно протекает на границе раздела литосферы с атмосферой, так как концентрации радона в массиве составляют десятки тысяч Бк/м³, а в атмосферном воздухе около десяти Бк/м³. Как видно из (1), интенсивность диффузионного переноса (плотность потока) радона зависит, главным образом, от концентрации ²²⁶Ra и длины диффузии радона в грунтах. Длина диффузии радона — среднее расстояние, на которое перемещаются атомы радона в среде с момента своего образования из радия до радиоактивного распада, она зависит от проницаемости грунта, определяющейся эффективной пустотностью и степенью водонасыщения грунтов, изменяется от 0.2–0.4 м в слабопроницаемых и/или водонасыщенных грунтах до 1.5–2.0 м в хорошо проницаемых сухих отложениях. Как показывают наши предыдущие исследования [3], используя (1), можно с достаточно высокой точностью оценить средние значения ППР на территориях, где выделение радона из грунтов обусловлено преимущественно диффузионным переносом.

Адвективный перенос — поток радона в объеме движущейся газовой фазы. Применяя закон Дарси к переносу радона, можно получить формулу для оценки адвективной составляющей ППР:

$$J = C_a v_D / \varepsilon_a, \quad (2)$$

где J — плотность потока радона, Бк/(м²с); C_a — объемная активность радона в поровом газе, Бк/м³; v_D — скорость адвективного переноса газа, м/с; ε_a — степень заполнения пор воздухом, д.ед.

Адвективный перенос радона распространен sporadически в пространстве и непостоянен во времени. В пространственном отношении адвективные потоки приурочены, как правило, к зонам повышенной проницаемости геологической среды, где возможны объемные потоки газов. Временная неоднородность адвективного потока грунтового газа обусловлена кратковременным или периодическим действием градиентов давления. Вместе с тем значения ППР за счет адвекции, как правило, значительно (более чем на порядок) выше, чем при диффузионном переносе. Частным случаем адвективного переноса является температурная конвекция в поле силы тяжести.

Конвективный перенос газов, называемый также “эффектом дымовой трубы”, обычно происходит при соблюдении трех условий [15]: 1) наличие проницаемой среды, где возможен объемный перенос газов (зоны трещиноватости, пещеры, горные выработки); 2) наличие перепада высот между точками, где проницаемые зоны выходят на дневную поверхность; 3) наличие перепада температур между грунтовым и атмосферным воздухом. В предыдущих исследованиях [14, 15] был зафиксирован прямой и обратный эффект дымохода в зависимости от времени года, вызывающий очень сильные сезонные колебания радона в зонах повышенной трещиноватости у подножия склонов горных массивов.

Выявление и картирование территорий с высокой потенциальной радоноопасностью для принятия первоочередных мер по защите населения от облучения радоном является приоритетной задачей во всем мире. В последнее время в этих целях все более активно используются возможности машинного обучения, в том числе для прогнозирования эксалиции радона с поверхности грунта. Больше число работ посвящено изучению методов машинного обучения и выбору наиболее эффективных из них, соответствующих задачам оценки потенциальной радоноопасности.

Такие методы, как Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS), Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM), Artificial Neural Networks (ANN), Group Methods of Data Handling (GMDH)¹ и др., ранее использовались для прогнозирования радоноопасности, концентраций радона в помещениях или других, связанных с радоном показателей. Методы машинного обучения также могут быть использованы для прогнозирования временных рядов радона: изменение во времени концентрации радона в почвенном газе для целей прогнозирования землетрясений [22] или для

реконструкции пробелов во временных рядах наблюдений при оценке облучения человека [12]. Возможности прогнозирования и построения карт потенциальной радоноопасности с помощью методов машинного обучения продемонстрированы в работах [8, 19–21].

В качестве исходных данных принимались геологическое строение (тип горных пород или почв), гидрогеологические условия, свойства грунтов, включая плотность, проницаемость, пористость, содержание урана (радия). Прогнозируемой величиной была концентрация радона либо в грунтовом газе, либо в помещениях. В большинстве перечисленных работ методы RF и ANN рассматриваются как лучшие и наиболее популярные для прогнозирования параметров радона, в то время как методы MARS, GBM, SVM и GMDH менее популярны. Однако это не исключает их полностью, поскольку некоторые из этих методов иногда превосходят методы ANN и RF по своей точности.

Цель данной работы — совершенствование методологических аспектов картирования плотности потока радона с использованием методов машинного обучения, а также выяснение факторов, влияющих на выделение радона из грунтов на территории, сложенной мощной толщей рыхлых песчано-глинистых отложений на территории г. Москва. Для целей прогноза плотности потока радона с поверхности грунта был протестирован метод RF, эффективность которого была показана нами ранее [10].

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТЕРРИТОРИИ

Территория Москвы — уникальный объект по объему доступных геологических данных, результатов измерения ППР и других радиационных параметров. Город расположен в центре Московской синеклизы Восточно-Европейской древней платформы. Территория города сложена с поверхности толщей четвертичных отложений, представленных на водоразделах в основном переслаиванием моренных суглинков и флювиогляциальных песков, а в долинах рек преимущественно песчаными аллювиальными отложениями. В юго-западной и южной частях города, южнее долины р. Москва, а также на севере (примерно севернее долины р. Лихоборка) поверхности водоразделов и наиболее высокой III террасы р. Москва перекрыты слоем покровных суглинистых образований мощностью 2–10 м. Общая мощность четвертичных отложений колеблется примерно от 10 м в долинах рек до 60–80 м на юго-западе города в пределах Теплотанской возвышенности. Ниже залегают мезозойские песчано-глинистые отложения, постилающиеся палеозойской карбонатно-терригенной толщей. Наибольшая мощность мезозойских отложений наблюдается в юго-западной части города в районе

¹ Многомерные адаптивные сплайны регрессии (MARS), метод случайного леса (RF), метод опорных векторов (SVM), искусственные нейронные сети (ANN), методы группового учета аргументов (GMDH).

Теплостанской возвышенности, а вдоль современных и древних долин р. Москвы и ее притоков эти отложения частично или полностью размыты эрозией.

На территории города отсутствует как современная тектоническая активность, так и активные разломы в их классическом понимании с наличием современных направленных подвижек вдоль их крыльев. Вместе с тем на территории города выделяются геодинамически активные зоны (ГДАЗ), представляющие собой пространственно локализованные линейные или изометричные объемы (участки) земной коры разного масштаба, в которых, в силу различных причин, имеются или могут возникать условия для концентрации и разрядки дополнительных тектонических напряжений и повышенных градиентов движений и деформированности горных пород [1, 2]. Наиболее крупная система геодинамически активных зон протягивается вдоль долины Москвы-реки (Москворецкая ГДАЗ). Эта система прослеживается далеко на юго-восток вплоть до г. Рязань и далее, по геофизическим данным, сбросовые деформации в этой зоне фиксируются в верхней части земной коры, в том числе и в отложениях чехла. Современная активность зоны в виде деформаций растяжения с правосдвиговой компонентой была выявлена повторными GPS-измерениями [2]. На севере Москвы выделяется также менее крупная Лихоборская ГДАЗ субширотного простирания, а также ряд геодинамически активных зон более мелкого ранга.

Предыдущие исследования [4] показали, что на территории Москвы ППР колеблется в широких пределах. В среднем значения ППР на водоразделах, сложенных глинистыми грунтами, выше, чем в долинах рек, где преобладают песчаные отложения. Средние значения ППР на территориях, сложенных суглинками и песками, составляют 40 и 24 мБк/(м²с) соответственно [4]. Среднее содержание ²²⁶Ra в суглинках — 15–25 Бк/кг, а в песках 10–15 Бк/кг. Вместе с тем на территории Москвы были обнаружены участки, где ППР в отдельных точках принимает аномально высокие значения, превышающие фоновый диапазон и достигающие значений 5000 мБк/(м²с) и более. Эти значения существенно превышают известные в мире уровни и сопоставимы со значениями ППР с поверхности урановых хвостохранилищ, концентрация радия в которых превышает 1000 Бк/кг [24]. Однако зарегистрированные аномалии не связаны с загрязнением территории ураном и радием или повышенным природным содержанием этих радионуклидов в грунтах. На всех аномальных участках удельная активность ²²⁶Ra в грунтах не превышает фоновых значений, характерных для территории города (15–30 Бк/кг). Аномалии составляют примерно 1% от общего количества измерений

ППР, проведенных в Москве [4]. Очевидно, что аномальные значения ППР с поверхности грунта нельзя объяснить диффузионным механизмом. Предположительно, выявленные радоновые аномалии связаны конвективным переносом радона на участках, характеризующихся повышенной проницаемостью грунтов.

Повышенная проницаемость грунтовых массивов в городских условиях может быть обусловлена разными причинами, как природного, так и техногенного характера. Среди природных причин следует упомянуть, прежде всего, развитие на территории Москвы сети геодинамически активных зон и линияментов, которые потенциально могут быть путями переноса радона. Кроме того, в долине р. Москва местами развиты суффозионные и карстово-суффозионные процессы, которые также могут способствовать формированию конвективных потоков радона в геологической среде.

Техногенные причины могут быть связаны, прежде всего, с линиями метро и наземной рельсовой инфраструктурой. Из-за постоянных вибраций структура грунта может деформироваться, а его проницаемость — увеличиваться или уменьшаться. Это особенно актуально для тоннелей метро, которые расположены близко к поверхности и были построены открытым способом выемки грунта, а также для наземных железнодорожных линий. Кроме того, возможно развитие разуплотнения над трассами подземных коллекторов различного назначения, а также над иными подземными сооружениями, не связанными с вибрационными нагрузками. Однако следует отметить, что пространственное воздействие этих факторов может быть очень ограниченным. Возможно сложное сочетание природных и техногенных факторов, влияющих на плотность потока радона из грунта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Измерение радиационных параметров и применяемые методы

Данные о ППР с поверхности грунта были получены в ходе выполнения инженерно-экологических изысканий для строительства в течение 2002–2008 гг. на 931 участке строительства (до начала строительных работ). Использовались материалы, предоставленные ГК РЭИ и ООО “ГЕОКОН”. Расположение обследованных участков представлено на рис. 1. На каждом участке были выполнены измерения следующих параметров: 1) плотности потока радона, сетка 5 × 10 м, не менее 10 на участок, 2) удельной активности ²²⁶Ra в образцах верхнего слоя почвы с участка, не менее 5 на участок, 3) мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения на высоте 1 м, измерительная сетка 10 × 15 м, не менее 10 на участок.

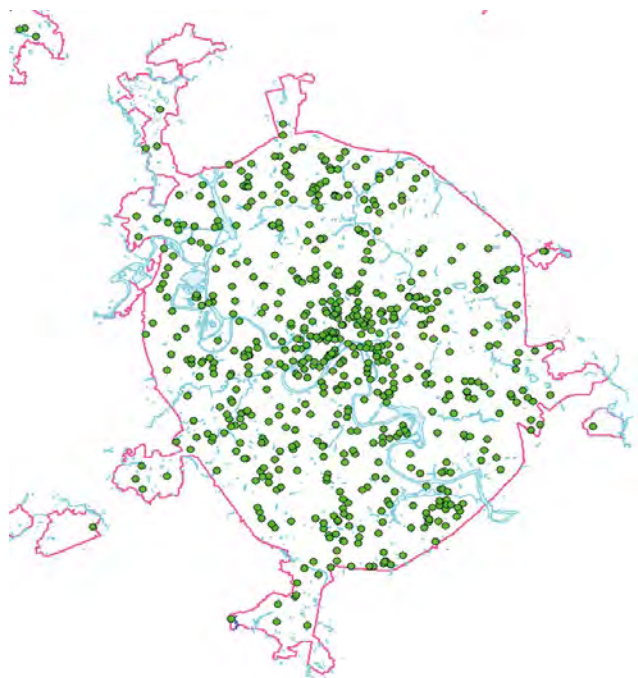


Рис. 1. Схема расположения участков измерений на территории Москвы.

Измерения ППР проводились с помощью измерительного комплекса “Камера-01” с использованием метода открытой камеры с активированным углем [23]. Для измерения ППР на поверхность грунта помещают камеру-накопитель с активированным углем и выдерживают, как минимум, 3 ч для сорбции радона. Затем активированный уголь пересыпают в закрытую колонку и после установления равновесия между радоном и его дочерними продуктами проводят измерения активности радона в угле с использованием бета-радиометра, входящего в состав измерительного комплекса “Камера-01”. Измерительный комплекс позволяет измерять ППР в диапазоне от 3 до 100 000 мБк/(м²с) при температуре окружающей среды от –15°C до 40°C при относительной влажности до 95% с общей неопределенностью результата менее 40%.

Измерения содержания ²²⁶Ra в грунтах проводились с помощью гамма-спектрометрии на основе детектора NaI(Tl) в сосудах Маринелли, объемом 1 л. В пробах предполагалось наличие радиоактивного равновесия между радоном и его дочерними продуктами распада. Всего использованы результаты анализа около 5000 образцов грунта, отобранных на глубине от 0.2 до 20 м.

Измерения МАЭД гамма-излучения проводились с помощью дозиметров гамма-излучения на основе счетчиков Гейгера–Мюллера: ДРГ-01-Т,

ДРГ-012 и ДКГ-07 и т.п. на высоте 1 м над поверхностью земли. Дозиметры могут регистрировать гамма-фотоны с энергией 30–3000 кэВ с погрешностью измерения <30%.

Было сформировано два набора данных, один из которых содержал 819 объектов, включающих только участки с фоновыми значениями ППР, а другой — 931 участок (фоновые + аномальные).

Методы машинного обучения

Предыдущее исследование продемонстрировало эффективность алгоритмов ANN и RF для прогнозирования плотности потока радона на территории Москвы с использованием геологических данных [10]. В этом исследовании использовались алгоритм Random Forest из пакета “Scikit-learn Python”. Для целей обучения и тестирования использовалось соотношение 80 : 20%, что является наиболее распространенной конфигурацией подобного разделения для целей машинного обучения. Категориальные данные, такие как, например, типы четвертичных отложений, были однократно закодированы цифрами. Алгоритм Random Forest использует случайные деревья-решения, которые усиливаются в процессе обучения, если результат прогнозирования близок к реальным данным. Затем полученные деревья, которые являются наиболее близкими, объединяются для получения окончательного прогноза.

Геологические данные

В исследовании использовались крупномасштабные геологические карты территории Москвы в границах МКАД масштаба 1 : 10 000, полученные под научно-методическим руководством Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН в ходе реализации проекта “Тематическое геологическое крупномасштабное картирование территории Москвы”. Карты были построены на основе цифровой обработки данных более 85 000 скважин, пробуренных в городе в разные годы, среди которых 13 000 глубоких [5, 17]. Для создания карт использовалась единая городская картографическая основа г. Москвы. В данной работе использовались карта абсолютных отметок кровли четвертичных и дочетвертичных отложений, карта четвертичных отложений, структурно-геоморфологическая карта (м-б 1 : 25 000), карта абсолютных отметок залегания уровня грунтовых вод.

Кроме того, на основе анализа результатов инженерно-экологических изысканий авторами была построена карта среднего содержания радия в четвертичных отложениях и карта мощности дозы гамма-излучения [10]. Для чтения, экспорта и редактирования всех геологических данных использовался пакет QGIS 3.24 Tisler. Чтобы собрать эти данные в модель машинного обучения, при-

меняли Python и TensorFlow, а также несколько библиотек Python, таких как Pandas, Geopandas, Matplotlib, Pyearth, Scikit-learn, Numpy и Scipy.

В итоге в качестве предикторов (исходных данных для прогноза) для применения методов машинного обучения использовались следующие данные (рис. 2):

- 1) тип четвертичных отложений;
- 2) удельная активность ^{226}Ra в приповерхностных грунтах, Бк/кг;
- 3) высота над уровнем моря, м;
- 4) расстояние до бровок склонов крутизной более 8° , м;
- 5) расстояние до линий железных дорог и линий метро, м;
- 6) распределение мощности амбиентного эквивалента дозы по площади, мЗв/ч;
- 7) расстояние до геодинамически активных зон, м;
- 8) расстояние до линеаментов, м;
- 9) глубина залегания подземных вод, м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Статистическая обработка полного набора данных показывает, что пространственное распределение ППР на территории города подчинено логнормальному закону. Среднее геометрическое значение ППР составляет 29 мБк/(м²с), медиана — 26 мБк/(м²с), геометрическое стандартное отклонение — 2.4. Согласно правилу “трех сигм” диапазон фоновых колебаний ППР составляет от 2 до 400 мБк/(м²с). Важно отметить, что нормируемый уровень ППР с поверхности грунта составляет 80 мБк/(м²с), согласно НРБ-99/2009. В данный диапазон укладываются значения ППР, которые могут быть объяснены преимущественно диффузионным переносом радона из грунта. Участки, на которых максимальные значения ППР > 400 мБк/(м²с), были отнесены к аномальным. Всего было выделено 112 таких участков. В ходе тестирования было обнаружено, что для целей машинного обучения набора данных, включающего только аномальные участки, недостаточно из-за малого объема обучающих данных, поэтому было принято решение использовать комбинацию аномальных и фоновых данных. В результате было создано два набора данных: один включал 819 фоновых значений ППР, а другой — 931 значение и содержал как фоновые, так и аномальные данные. Результирующие карты ППР в Москве как для фоновых данных, так и для полного набора данных показаны на рис. 3.

Модель Random Forest продемонстрировала надежные прогностические возможности. Среднеквадратическая ошибка модели составила 14.9, коэффициент детерминации $R^2 = 0.97$, что отражает высокую корреляцию прогнозных и калибровочных значений. Эти показатели свидетельствуют, что Random Forest эффективно улавливает сложные закономерности и взаимодействия в наборе данных, обеспечивая точные и надежные прогнозы уровней ППР. Примечательно, что полученное значение R^2 — весьма высокое по сравнению с результатами аналогичных исследований, например, в работе [18] $R^2 = 0.24$, а в [13] этот показатель был равен 0.62. Вместе с тем неизвестно, связано ли полученное нами высокое значение R^2 с более точной картой или с чрезмерной подгонкой, осуществляемой алгоритмом Random Forest, что является одним из его недостатков.

Карта прогнозной ППР с применением алгоритма Random Forest и использованием только фонового набора данных представлена на рис. 3а, на котором видно, что более высокие значения ППР в соответствии с прогнозом наблюдаются в юго-западной части города в районе Теплостанской возвышенности, а также в несколько меньшей степени и в северной части города. Области повышенных значений ППР, в целом, совпадают с распространением моренных и покровных суглинков, характеризующихся относительно высоким содержанием ^{226}Ra . Полученная прогнозная карта ППР хорошо согласуется с литологической картой, а также картой радонового поля Москвы, построенной ранее методом интерполяции данных [4], что можно рассматривать как некоторую дополнительную верификацию принятой модели машинного обучения.

Интересно, что искусственные сооружения, такие как железнодорожная инфраструктура, линии метро, а также природные особенности рельефа (тальвеги, крутые склоны (перепады высот), геодинамически активные зоны и линеаменты) не оказывают заметного влияния на фоновую ППР. Корреляция между ППР и расстоянием до перечисленных выше объектов не является значимой, коэффициенты корреляции не превышают значения $r = \pm 0.06$. Вместе с тем анализ алгоритма и результатов прогноза показывает, что значимыми предикторами для прогноза фоновых значений ППР являются тип четвертичных отложений ($r = 0.12$), содержание ^{226}Ra в приповерхностных грунтах ($r = 0.14$), глубина залегания подземных вод ($r = 0.12$) и абсолютная высота участка ($r = 0.19$). Все перечисленные параметры проявляют статистически значимую (при $\alpha = 0.05$) прямую корреляцию с ППР с поверхности грунта. Однако следует отметить, что все эти параметры определенным образом связаны между собой. Возвышенные участки (Теплостанская и Смолен-

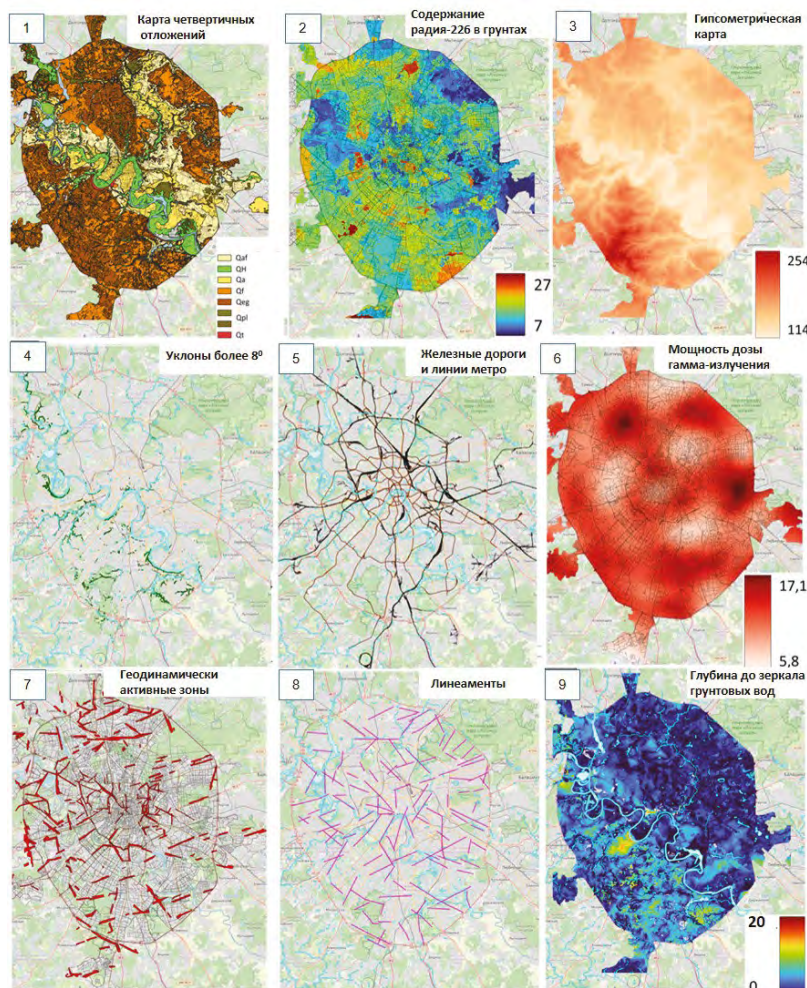


Рис. 2. Карты первичных предикторов, используемые для прогнозов с применением методов машинного обучения (пояснения в тексте).

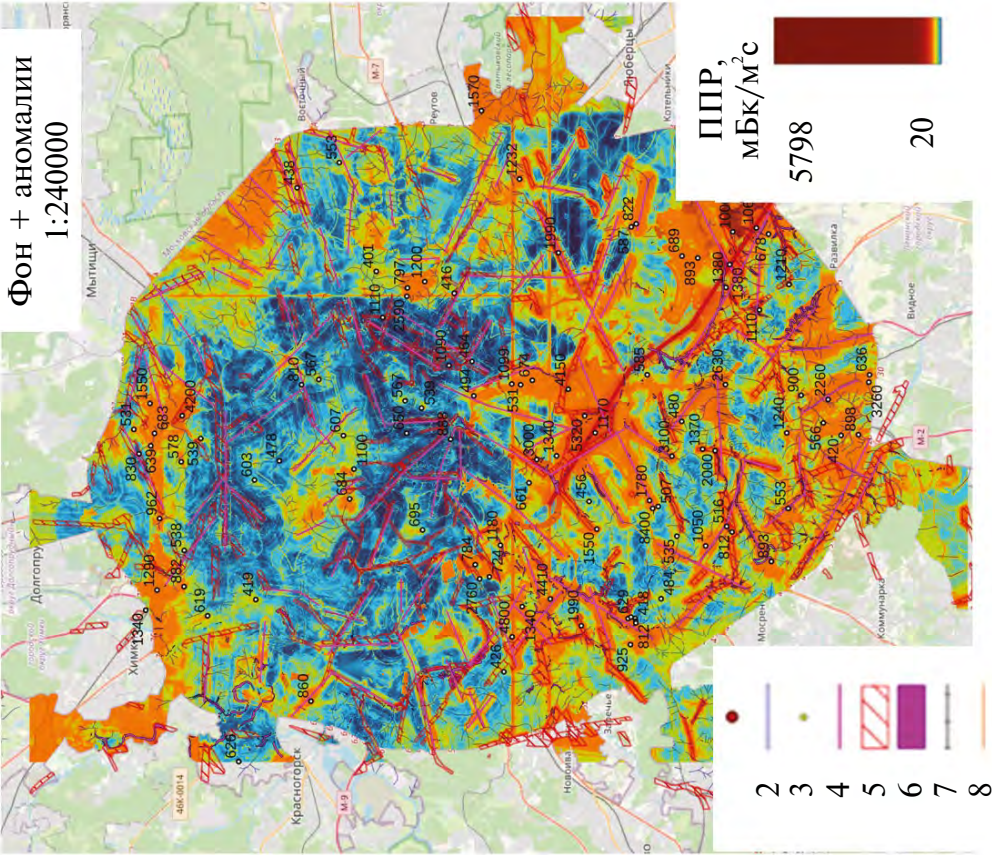
ско-Московская возвышенности) сложены преимущественно суглинками, содержащими более высокие концентрации ^{226}Ra , и характеризуются более глубоким залеганием подземных вод. В то время как долины рек, а также Мещерская низменность на востоке города сложены преимущественно слаборадиоактивными песками с неглубоким залеганием подземных вод. Установленный комплекс факторов свидетельствует, что фоновая ППР формируется преимущественно за счет диффузионного выноса радона из приповерхностных грунтов.

Следует отметить, что авторам пока еще не удалось довести алгоритм до совершенства, и, например, в южной части карт (см. рис. 3а,б) можно видеть горизонтальную линию, пересекающую весь город от Солнцево до Люберец. К сожалению, эта линия объясняется несовершенством работы алгоритма, когда алгоритм воспринял заданные координаты Y как предиктор более высокой плотности потока радона. В настоящий момент

ведется работа по совершенствованию алгоритма для устранения данного эффекта.

Картина меняется с введением в набор данных по аномальным значениям ППР (см. рис. 3б). В этом случае алгоритм воспринимает в качестве значимых предикторов такие природные и техногенные факторы, как геодинамически активные зоны, градиенты уклонов земной поверхности, а также линии железной дороги. Геодинамически активные зоны и градиенты уклонов рельефа оказывают заметное влияние, которое, однако, в значительной степени зависит от местоположения участков. На возвышенностях воздействие этих факторов сильнее, чем в долинах рек. Наблюдается относительно тесная значимая отрицательная корреляция между ППР на аномальных участках и расстоянием до ближайшей геодинамически активной зоны ($r = -0.23$) и бровки склонов, крутизной более 8° ($r = -0.22$). Среди техногенных факторов в качестве наиболее сильного предиктора, влияющего на формирование аномальных

(б)



(а)

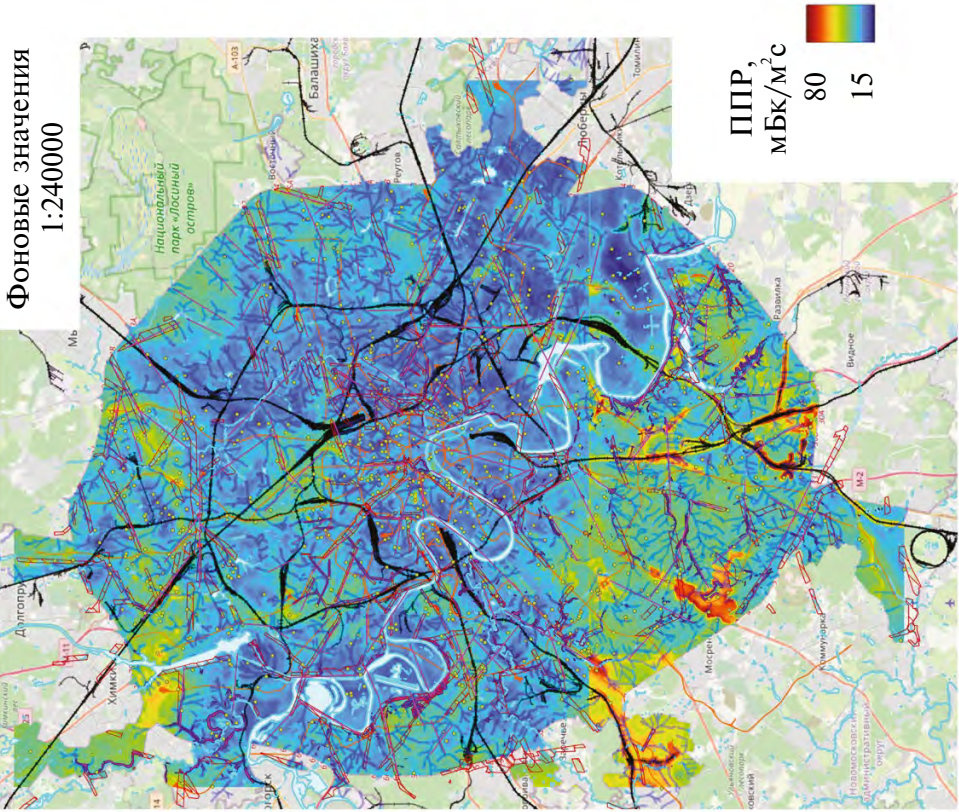


Рис. 3. Карта прогноза ППР, составленная с использованием: а – фоновых значений и алгоритма Random Forest; б – полного набора данных (аномальные и фоновые участки). Алгоритм Random Forest с квантильным цветовым масштабированием. Условные обозначения: 1 — участки с аномалиями ППР, 2 — тальвеги, 3 — участки с фоновыми значениями ППР, 4 — линейные элементы, 5 — геодинамически активные зоны, 6 — уклоны более 8°, 7 — железные дороги, 8 — линии метро.

значений ППР, алгоритм рассматривает расстояние до железнодорожных линий ($r = -0.15$). Тогда как трамвайные линии и линии метро, как это ни странно, не рассматриваются алгоритмом как важные, значимая корреляция между ППР и расстоянием до этих объектов техногенной инфраструктуры отсутствует. Следует отметить, что, несмотря на существенную разницу в результатах прогноза ППР с учетом радоновых аномалий и без их учета, в обоих случаях прослеживаются в целом более высокие значения ППР на возвышенностях и низкие в долинах рек.

Таким образом, как показывает анализ результатов прогноза ППР с применением методов машинного обучения, в качестве основных факторов, способствующих формированию ее аномальных значений на территории Москвы, по-видимому, выступают геодинамически активные зоны, являющиеся зонами повышенной трещиноватости и проницаемости среды, а также наличие уклонов поверхности (перепада высот) и техногенного вибрационного воздействия железнодорожного транспорта. Возможно сочетание этих факторов, например, радоновые аномалии часто встречаются на участках, где железные дороги проходят в глубоких природных или искусственных понижениях (выемках), а также в областях пересечения геодинамически активных зон со склонами речных долин и оврагов. Данные факты свидетельствуют о вероятном формировании аномальных значений ППР в результате конвективного переноса радона в проницаемых зонах.

Качество и объем данных имеют решающее значение для применения алгоритмов машинного обучения. Это еще более важно для целей выявления радоновых аномалий, поскольку они обычно намного превышают фоновые значения выделения радона, а наличие лишь небольшого числа точек данных приводит к низкому качеству получаемых прогнозов. Это привело к появлению некоторых ложных линий на карте прогноза ППР, а также к необоснованному увеличению средней ППР по всей территории при прогнозе с учетом ее аномальных значений. Согласно карте на рис. 3б, большая часть южной части города будет классифицирована как радоноопасная с очень значительным превышением допустимых значений ППР ($80 \text{ мБк}/(\text{м}^2\text{с})$), что явно является завышенным прогнозом. В настоящее время работа над усовершенствованием алгоритмов прогноза ППР с использованием методов машинного обучения продолжается.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что методы машинного обучения могут с успехом применяться для составления карт потенциальной

радоноопасности городских территорий. Полученные карты плотности потока радона с поверхности грунта с учетом только фоновых значений ППР ($<400 \text{ мБк}/(\text{м}^2\text{с})$) показывают хорошую сходимость с картами, построенными с применением обычных методов интерполяции данных, но при этом более точно соответствуют геологическим и литологическим границам. Анализ значимости предикторов подтверждает, что наиболее важными факторами, обуславливающими фоновые значения плотности потока радона, являются:

- литологический тип грунта,
- концентрация в грунтах ^{226}Ra ,
- глубина залегания грунтовых вод.

Анализ полного набора данных, включающего как фоновые, так и аномальные значения ППР, свидетельствует, что в формировании аномальных радоновых полей существенную роль играют следующие факторы:

- близость к геодинамически активным зонам,
- близость к склонам крутизной более 8° ,
- близость к линиям железных дорог.

Влияние геодинамически активных зон, по-видимому, в значительной степени зависит от точного местоположения и сопутствующих геологических и ландшафтных факторов (тип грунта, наличие уклонов поверхности и т.п.). В целом, влияние техногенных факторов, за исключением линий железных дорог, на поток радона в условиях города не слишком велико. Возможна суперпозиция перечисленных выше факторов. Изучение механизмов влияния природных и техногенных факторов на аномальные выбросы радона — тема нашей дальнейшей работы.

Установленная связь радоновых аномалий с геодинамически активными зонами (участками повышенной проницаемости геологической среды) и склонами (перепадом высот) свидетельствует о возможном формировании аномалий ППР в результате конвективной циркуляции воздуха в проницаемых областях верхней части грунтовых массивов за счет перепада температур между грунтовым массивом и атмосферой [15]. Этот механизм может объяснить наличие контрастных радоновых аномалий на платформенных территориях, где отсутствует активная разрывная тектоника, распространены рыхлые четвертичные отложения большой мощности и близко к поверхности залегают подземные воды.

Следует отметить, что разработанные алгоритмы прогноза плотности потока радона еще далеки от совершенства и обладают рядом существенных недостатков, к которым можно отнести появление на картах ложных линий, связанных с техниче-

скими проблемами анализа данных, завышение средних прогнозных значений ППР при учете аномальных значений, появление на картах областей повышенных или пониженных значений ППР, которые явно не связаны с какими-то природными или техногенными факторами, а объясняются особенностями алгоритма.

Эти проблемы требуют решения в ходе дальнейших исследований, включая усовершенствование модели и ее верификацию. Однако, несмотря на все ограничения, полученная модель может быть полезна в качестве инструмента для выделения областей с потенциально высокими потоками радона и определения влияния определенных геологических и техногенных факторов на формирование плотности потока радона.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-17-00217.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Макаров В.И., Дорожко А.Л., Макарова Н.В., Макеев В.М. Современные геодинамически активные зоны платформ // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2007. № 2. С. 99–110.
- Макарова Н.В., Макеев В.И., Дорожко А.Л. и др. Геодинамические системы и геодинамически активные зоны Восточно-Европейской платформы // Бюл. Моск. общества испытателей природы. Отд. геол. 2016. Т. 91. Вып. 4–5. С. 9–22.
- Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: “Перо”, 2016. 394 с.
- Микляев П.С., Макаров В.И., Дорожко А.Л. и др. Радоновое поле Москвы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2013. № 2. С. 172–187.
- Осипов В.И. Крупномасштабное геологическое картирование территории г. Москвы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2011. № 3. С. 195–197.
- Bossey P., Cinelli G., Ciotoli G.; Crowley Q.G. et al. Development of a Geogenic Radon Hazard Index — Concept, History, Experiences // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2020. 17: 4134. <https://doi.org/10.3390/ijerph17114134>
- Di Carlo C., Maiorana A., Bochicchio F. Indoor Radon: Sources, Transport Mechanisms and Influencing Parameters. 2023. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111710>
- Friedman J.H. Multivariate adaptive regression splines (with discussion). The Annals of Statistics. 1991. 19:1–141.
- Gavriliev S., Petrova T., Miklyaev P. Factors influencing radon transport in the soils of Moscow // Environ Sci Pollut Res. 2022, no. 29, pp. 88606–88617. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21919-y>
- Gavriliev S., Petrova T., Miklyaev P., Karfidova, E. Predicting radon flux density from soil surface using machine learning and GIS data // Science of The Total Environment. 2023. 903:166348, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166348>
- ICRP. Radiological protection against radon exposure. 2014. No. 126. <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20126>
- Janik M., Bossey P., Kurihara O. Machine learning methods as a tool to analyse incomplete or irregularly sampled radon time series data // Science of The Total Environment. 2018. V. 630. P. 1155–1167.
- Mair J., Petermann E., Lehné R., Henk A. Can neotectonic faults influence soil air radon levels in the Upper Rhine Graben? An exploratory machine learning assessment // Science of The Total Environment. 2024. 956:177179. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177179>
- Miklyaev P., Petrova T., Marennyy A, et al. High seasonal variations of the radon exhalation from soil surface in the fault zones (Baikal and North Caucasus regions) // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. 219, 106271. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106271>
- Miklyaev P.S., Petrova T.B., Shchitov D.V., Sidiyakin P.A. et al. Radon transport in permeable geological environments // Sci. Total Environ. 2022. V. 852:158382. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158382>
- Nazaroff W.W. Radon transport from soil to air // Reviews of Geophysics. 1992. 30(2):137. <https://doi.org/10.1029/92rg00055>
- Osipov V.I., Burova V.N., Zaikanov V.G., Molodykh I.I. et al. A map of large-scale (detail) engineering geological zoning of Moscow territory // Water Resources. 2012. 39(7):737–746. <https://doi.org/10.1134/S0097807812070093>
- Petermann E., Bossey P., Kemski J. et al. Development of a high-resolution indoor radon map using a new machine learning- based probabilistic model and German radon survey data // Environ. Health Perspect. 2024.132 (9):97009. <https://doi.org/10.1289/EHP14171>
- Petermann E., Meyer H., Nussbaum M., Bossey P. Mapping the geogenic radon potential for Germany by Machine Learning. 2020. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8501>
- Rezaie F., Panahi M., Bateni S. M., Kim S. et al. Spatial modeling of geogenic indoor radon distribution in Chungcheongnam-do, South Korea using enhanced machine learning algorithms // Environment International. 2023. 171:107724. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107724>
- Timkova J., Fojtikova I., Pacheroova P. Bagged neural network model for prediction of the mean indoor radon concentration in the municipalities in Czech Republic // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. 166:398–402. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.07.008>
- Torkar D., Zmazek B., Vaupotic J., Kobal I. Application of artificial neural networks in simulating radon levels in soil gas // Chemical Geology. 2010. 270(1–4):1–8. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.09.017>
- Tsapalov A., Kovler K., Miklyaev P. Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from

- soil surface // Journal of Environmental Radioactivity. 2016. 160:28–35.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.04.016>
24. UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. 2000. No. 1.
https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html. Accessed 15 Apr 2022
25. WHO Handbook on indoor radon. WHO Handbook on Indoor Radon: a public health perspective. Hajo Zeeb and Ferid Shannoun (eds), Geneva, WHO Press, 2009.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS ON RADON FLUX DENSITY IN MOSCOW USING MACHINE LEARNING METHODS

S. G. Gavriliev^a, T. B. Petrova^{b, #}, P. S. Miklyaev^{a, ##}, E. A. Karfidova^a

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, bld.2, Moscow, 101000 Russia*

^b*Department of Radiochemistry, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*

[#]*E-mail: thp111@inbox.ru*

^{##}*E-mail: peterm7@inbox.ru*

During routine measurements of radon flux density for construction purposes in Moscow, the areas were found with abnormally high radon flux densities exceeding 400 mBq m⁻² s⁻¹. These values far exceed those average values around 24–40 mBq m⁻² s⁻¹ for local sandy and clay soils, which is compounded with the fact that the area under study doesn't contain any active faults or natural soils rich in uranium. Therefore, the question arises, whether these high values are of technogenic or natural origin. This paper uses machine learning algorithms to find the answer to these questions. Machine learning algorithms including random forest trees and artificial neural networks were used to try and predict radon flux density anomalies on a city scale. Predictors used included maps of geodynamically active areas, lineaments, distances to heavy rail infrastructure such as metro tunnels and surface-level rail. Additionally, normal predictors of radon such as ²²⁶Ra concentration in soil, quaternary soil type and elevation were used for the predictions. Predictions were made for both anomaly-free and anomaly included datasets. Training data included radon flux data for Moscow with both anomalous and background values which included 931 data points, of which 112 was classified as anomalous (more than 400 mBq m⁻² s⁻¹). Based on the predictions obtained, factors which influence radon flux density and those that may produce anomalous values were underlined.

Keywords: radon, machine learning, Random Forest, radon flux density, potential radon hazard, forecast

REFERENCES

1. Makarov, V.I., Dorozhko, A.L., Makarova, N.V., Makeev, V.M. [Modern geodynamically active zones of platforms.] *Geoekologiya*, 2007, no. 2, pp. 99–110. (in Russian)
2. Makarova, N.V., Makeev, V.I., Dorozhko, A.L., Sukhanova, T.V., Korobova, I.V. [Geodynamic systems and geodynamically active zones of the East-European platform]. *Byulleten MOIP, ser. Geol*, 2016, vol. 91, pp. 4–5. (in Russian)
3. Marennyy, A.M., Tsapalov, A.A., Miklyaev, P.S., Petrova T.B. [Regularities in radon field formation in geoenvironment]. Moscow, Pero Publ., 2016, 394 p. (in Russian)
4. Miklyaev, P.S., Makarov, V.I., Dorozhko, A.L., Petrova, T.B., Marennyi, M.A., Marennyi, A.M., Makeev V.M. [Radon field of Moscow]. *Geoekologiya*, 2013, no. 2, pp. 172–187. (in Russian)
5. Osipov, V.I. [Large-scale geological mapping of Moscow territory]. *Geoekologiya*, 2011, no. 3, pp. 195–197. (in Russian)
6. Bossew, P., Cinelli, G., Ciotoli, G., Crowley, Q.G., De Cort, M., Elío Medina, J., Gruber, V., Petermann, E., Tollefsen, T. Development of a geogenic radon hazard index—concept, history, experiences. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2020, no. 17, p. 4134.
<https://doi.org/10.3390/ijerph17114134>
7. Di Carlo, C., Maiorana, A., Bochicchio, F. Indoor radon: sources, transport mechanisms and influencing parameters. *IntechOpen*, 2023. doi: 10.5772/intechopen.111710
8. Friedman, J. H. Multivariate adaptive regression splines (with discussion). *The Annals of Statistics*, 1991, no. 19, pp. 1–141.
9. Gavriliev, S., Petrova, T., Miklyaev, P. Factors influencing radon transport in the soils of Moscow. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2022, no. 29, pp. 88606–88617.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-21919-y>

10. Gavriliev, S., Petrova, T., Miklyaev, P., Karfidova, E. Predicting radon flux density from soil surface using machine learning and GIS data. *Science of the Total Environment*, 2023, no. 903, p. 166348, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166348>
11. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication no. 126, 2014. <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20126>
12. Janik, M., Bossew, P., Kurihara, O.. Machine learning methods as a tool to analyze incomplete or irregularly sampled radon time series data. *Science of the Total Environment*, 2018, no. 630, pp.1155–1167.
13. Mair, J., Petermann, E., Lehné, R., Henk, A. Can neotectonic faults influence soil air radon levels in the Upper Rhine Graben? An exploratory machine learning assessment. *Science of the Total Environment*, 2024, no. 956, p. 177179, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177179>
14. Miklyaev, P., Petrova, T., Marennyy, A., Shchitov, D., Sidiyakin, P., Murzabekov, M., Lopatin, M. High seasonal variations of the radon exhalation from soil surface in the fault zones (Baikal and North Caucasus regions). *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, no. 219, pp. 106271.
15. Miklyaev, P.S., Petrova, T.B., Shchitov, D.V., Sidiyakin, P.A., Murzabekov, M.A., Tsebro, D.N., Marennyy, A.M., Nefedov, N.A., Gavriliev, S.G. Radon transport in permeable geological environments. *Sci. Total Environ.*, 2022, vol. 852, p. 158382. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158382.
16. Nazaroff, W.W. Radon transport from soil to air. *Reviews of Geophysics*, 1992. vol. 30, issue 2, pp.137–160. <https://doi.org/10.1029/92rg00055>
17. Osipov, V.I., Burova, V.N., Zaikanov, V.G., Molodykh, I.I., Pyrchenko, V.A., Savits'ko, I.S. A map of large-scale (detail) engineering geological zoning of Moscow territory, *Water Resources*, 2012, no. 39(7), pp. 737–746. DOI: 10.1134/S0097807812070093.
18. Petermann, E., Bossew, P., Kemski, J., Gruber, V., Suhr, N., Hoffmann, B., Development of a high-resolution indoor radon map using a new machine learning- based probabilistic model and German radon survey data. *Environ. Health Perspect.*, 2024, no.132 (9), p. 97009. <https://doi.org/10.1289/EHP14171>
19. Petermann, E., Meyer, H., Nussbaum, M., & Bossew, P. Mapping the geogenic radon potential for Germany by machine learning. 2020. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8501>
20. Rezaie, F., Panahi, M., Bateni, S. M., Kim, S., Lee, J., Lee, J., Yoo, J., Kim, H., Won Kim, S., & Lee, S.. Spatial modeling of geogenic indoor radon distribution in Chungcheongnam-do, South Korea using enhanced machine learning algorithms. *Environment International*, 2023, no. 171, p. 107724. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107724>
21. Timkova, J., Fojtikova, I., Pacherova, P. Bagged neural network model for prediction of the mean indoor radon concentration in the municipalities in Czech Republic. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, no. 166, pp. 398–402. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.07.008>
22. Torkar, D., Zmazek, B., Vaupotič, J., Kobal, I. Application of artificial neural networks in simulating radon levels in soil gas. *Chemical Geology*, 2010, vol. 270, issues 1–4, pp.1–8. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.09.017>
23. Tsapalov, A., Kovler, K., Miklyaev, P. Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from soil surface. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, no.160, pp. 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.04.016>
24. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR, 2000, no.1. https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html. Accessed April 15, 2022 <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106271>
25. WHO Handbook on Indoor Radon: a public health perspective. Hajo Zeeb and Ferid Shannoun, Eds., Geneva, WHO Press, 2009