

ISSN 0869-7809

Номер 5

Сентябрь - Октябрь 2023



ГЕОЭКОЛОГИЯ

*Инженерная геология
Гидрогеология
Геокриология*

www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 5, 2023

Инженерно-геологические процессы как результат деятельности микроорганизмов
(на примере подземного пространства Санкт-Петербургского региона)

Р. Э. Дашко, А. Г. Карпенко, Д. Л. Колосова

3

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Роль суффозии в формировании инженерно-геологических условий территории Белоруссии

И. А. Красовская, А. Н. Галкин, А. И. Павловский, С. В. Андрушко

17

О причинах затухания термосуффозионных процессов на бестяхской террасе
р. Лены в центральной Якутии

Л. А. Гагарин, В. В. Оленченко, Н. А. Павлова

28

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Оценка реакции грунтов оснований инженерных сооружений на воздействие
навала ледовых полей

В. Н. Кутергин, А. Б. Манукин, Ф. С. Карпенко, К. В. Панков

43

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оценка современного эколого-гидрогеологического состояния и прогноз
его изменения на территории размещения золоотвала Читинской ТЭЦ-1
(Восточное Забайкалье)

И. А. Федоров, Л. И. Усманова

52

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

Остатки от сжигания твердых коммунальных отходов: состав, выщелачивание
загрязняющих веществ, обработка для уменьшения воздействия
на окружающую среду

Т. И. Юганова, В. С. Путилина

65

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Геоэкологический профиль города для эффективного планирования

В. Г. Заиканов, Т. Б. Минакова, Е. В. Булдакова

79

Моделирование пространственного распределения хрома и марганца в почве:
подбор обучающего подмножества

А. С. Буторова, А. В. Шичкин, А. П. Сергеев, Е. М. Баглаева, А. Г. Бувеч

88

Contents

Number 5, 2023

Engineering geological processes as a result of microorganisms activity
(on the example of St. Petersburg subsurface)

R. E. Dashko, A. G. Karpenko, D. L. Kolosova

3

NATURAL AND TECHNONATURAL PROCESSES

The role of suffosion in the formation of engineering geological conditions
in the territory of Belarus

I. A. Krasovskaya, A. N. Galkin, A. I. Pavlovsky, S. V. Andrushko

17

Causes of the thermal suffosion attenuation on the Bestyakh terrace of the Lena River,
Central Yakutia

L. A. Gagarin, V. V. Olenchenko, N. A. Pavlova

28

SOIL AND ROCK ENGINEERING AND MECHANICS

Evaluation of soil response in the base of engineering structures to the impact
of bulk ice fields

V. N. Kutergin, A. B. Manukin, F. S. Karpenko, K. V. Pankov

43

ENVIRONMENT CONTAMINATION

Assessment of the current ecological and hydrogeological state and forecast
of its changes in the Chita TPP-1 ash dump territory (Eastern Transbaikalia)

I. A. Fedorov, L. I. Usmanova

52

UTILIZATION AND DISPOSAL OF WASTE

Residues from municipal solid waste incineration: composition, groundwater pollutant
leaching, treatment to reduce environmental impact

T. I. Yuganova, V. S. Putilina

65

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

Geoenvironmental profile of a city for effective urban planning

V. G. Zaikanov, T. B. Minakova, E. V. Buldakova

79

Modeling of the spatial distribution of chrome and manganese in soil:
selection of a training subset

A. S. Butorova, A. V. Shichkin, A. P. Sergeev, E. M. Baglaeva, A. G. Buevich

88

УДК 624.131.1:620.193.8:556.315

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КАК РЕЗУЛЬТАТ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МИКРООРГАНИЗМОВ (НА ПРИМЕРЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО РЕГИОНА)

© 2023 г. Р. Э. Дашко^{1,*}, А. Г. Карпенко¹, Д. Л. Колосова¹

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
21 линия Васильевского острова, 2, Санкт-Петербург, 199106 Россия

*E-mail: regda2002@mail.ru

Поступила в редакцию 28.08.2023 г.

После доработки 28.08.2023 г.

Принята к публикации 14.09.2023 г.

В краткой форме показаны становление учения о подземных микроорганизмах и использование его научных обобщений и экспериментальных данных в теории и практике инженерно-геологических и гидрогеологических исследований с применением прямых и косвенных методов, в том числе современного метагеномного анализа 16S рРНК. Установлены основные источники поступления микроорганизмов в подземное пространство Санкт-Петербурга, которые систематизированы по масштабу их воздействия и генезису. Анализ и оценка инженерно-геологических процессов как результата деятельности подземной микробиоты отражают основные аспекты, определяющие уровень безопасности освоения и использования подземного пространства мегаполиса для различных целей: проектирования, строительства и эксплуатации подземных сооружений (перегонных тоннелей метрополитена) на различных глубинах, проходки глубоких котлованов для наземного строительства и др. Результаты исследований деятельности подземных микроорганизмов дают возможность сделать вывод о необходимости расширения инженерно-геологического, гидрогеологического и инженерно-экологического изучения подземного пространства различных регионов с целью познания степени опасности деятельности подземной микробиоты и снижения числа аварийных и предаварийных ситуаций.

Ключевые слова: *подземное пространство, микробиологические исследования, источники поступления микроорганизмов, контаминация, природно-техногенные процессы, прогнозирование*

DOI: 10.31857/S086978092305003X, EDN: IGFMRС

ВВЕДЕНИЕ

Современные достижения в междисциплинарных науках дали возможность оценить значимость и необходимость всестороннего изучения подземных микроорганизмов, активность деятельности которых подтверждается на больших глубинах – до 4–5 км [18]. Их деятельность проявляется в формировании состава и состояния подземных вод, преобразовании песчано-глинистых грунтов [8, 30], развитии опасных инженерно-геологических процессов на различных глубинах, что фиксируется при освоении и использовании подземного пространства мегаполисов, крупных городов, а также при разработке полезных ископаемых [16, 21, 31]. Становление науки о деятельности подземных микроорганизмов происходило, начиная с периода активного развития микробиологии в конце XIX в. Большую роль в изучении деятельности микроорганизмов как участников геологических процессов и явлений сыграли микробиологи

и геологи, работавшие на стыке наук (С.Н. Виноградский, А.А. Иностранцев, Г.А. Надсон, В.Л. Омелянский и др.). Первые отечественные работы в связи с изучением влияния микроорганизмов на формирование осадочных отложений были опубликованы в начале XX в. [26]. В первой четверти прошлого столетия в Петрограде Б.Л. Исаченко исследовал причины разрушения кирпичной кладки стен оранжерейного комплекса тропических растений Ботанического сада и городской водонапорной башни на Шпалерной улице, деструктором которых оказались нитрифицирующие бактерии и продукты их метаболизма [15]. Им же впоследствии были начаты первые работы в СССР по вопросам коррозии бетонов гидротехнических сооружений Волховстроя и Свирьстроя в 1931 г. [14].

В 1924 г. Т.Л. Гинзбург-Карагичева доказала наличие богатого биоценоза и метаболитов на глубине свыше 1 км в пределах газонефтяных ме-

сторождений [5], а позднее, во второй половине XX в., А.Е. Крисс проанализировал влияние высоких давлений воды и пород на рост и активность микроорганизмов [18].

Большую роль в изучении геологической деятельности микроорганизмов сыграл академик В.И. Вернадский, который в первой четверти XX в. сформировал новую междисциплинарную науку – биогеохимию, введя представление о живом веществе и его роли в земной коре. Активное развитие данного направления началось в послевоенные годы и было связано с вопросами влияния микробиоты на формирование минералов и горных пород, а также месторождений полезных ископаемых, что отражено в работах В.О. Таусона [32], Б.Л. Исаченко [13]; С.И. Кузнецова, М.В. Иванова, Н.Н. Ляликовой [20]; Л.Е. Крамаренко [17] и др. Тогда же впервые рассматривалась роль микроорганизмов в преобразовании состава, состояния и свойств грунтов [27]. В 1980-х гг. школой МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством академика Е.М. Сергеева в теорию и практику инженерной геологии был внедрен ряд принципов микробиологии [3, 28].

Начиная со второй половины XX в., рядом советских ученых был сделан прорыв в изучении биокоррозии конструкционных материалов, актуальность этих исследований не потеряла своей остроты и в наши дни [2, 25, 29].

В 1996 г. на международном симпозиуме в Давосе на основании решения мирового сообщества специалистов и ученых, работающих в разных областях знаний (микробиологи, геологи, биотехнологи, биохимики, биофизики, радиобиологи и др.), была выделена самостоятельная междисциплинарная наука “Подземная микробиология” (Subsurface microbiology) [7].

На кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета первые микробиологические исследования были начаты в 1988 г. в связи с вопросами длительной устойчивости сооружений промышленной гидротехники, расположенных в водоохранной зоне р. Луга, впадающей в Балтийское море. В разрезе оснований сооружений и их примыкания с помощью посевов был выделен богатый микробиоценоз, который способствовал полному самоочищению грунтовых вод от нефтепродуктов – соляного масла. Было установлено, что деятельность подземных микроорганизмов сопровождается накоплением большого количества микробной массы в песчано-глинистых грунтах, что приводит к снижению их сопротивления сдвигу. Этот факт был использован в расчетах устойчивости дамб хвостохранилищ при подъеме отметки намыва.

С 1990-х гг. опыт, полученный на хвостохранилище, был направлен на исследование опасных

процессов, вызванных микробной деятельностью в подземном пространстве Санкт-Петербурга и в некоторых горнопромышленных регионах России [7, 9, 35]. Накопление и анализ полученных материалов полевых и лабораторных исследований на различных объектах позволили включить подземные микроорганизмы и их метаболиты в значимый компонент подземного пространства при его освоении и использовании. Такой подход дает возможность повысить научно-практический уровень прогнозирования безопасности освоения и использования подземного пространства городов и горнопромышленных регионов.

МЕТОДЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Примененные в прошлом и используемые в настоящее время микробиологические методы исследования биоценозов грунтов, подземных вод и разрушенных материалов можно разделить на косвенные и прямые. В конце XX – начале XXI вв. в практику исследований сотрудниками кафедр гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета (далее СПб Горный университет) под руководством профессора Р.Э. Дашко были внедрены косвенные методы. Они базировались на биохимическом определении микробного белка, поскольку клетки микроорганизмов и частично продукты их метаболизма, за исключением газов, спиртов и кислот, – представлены белками (энзимами) на 40–70%. Для численного определения содержания микробного белка (далее – МБ), или микробной массы (далее – ММ) применялись методы: М. Бредфорда, Т.М. Лоури и Хартри-Петерсона. Впервые метод М. Бредфорда был адаптирован для определения МБ в грунтах на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского государственного университета [23]. Этот метод дает наиболее низкие значения показателя МБ (ММ), поскольку для отделения биопленок от дисперсных частиц (после которого определяется величина белка в супернатанте) при центрифугировании используют 1.5 тыс. g (g – ускорение свободного падения), реже 2 тыс. g, что недостаточно для полного отделения биомассы от твердой поверхности [12]. Наиболее достоверные результаты были получены при использовании метода Хартри-Петерсона, в котором определение белка производится путем полного отделения биопленки электрофорезом.

Начиная с 2003 г., наряду с косвенными методами сотрудники кафедры гидрогеологии и инженерной геологии СПб Горного университета стали широко использоваться прямые методы определения физиологических групп и численности микроорганизмов путем посевов на питательные среды для грунтов, подземных вод и раз-

рушенных конструкционных материалов [7]. С 2018 г. профессор Р.Э. Дашко начала применять метагеномный анализ 16S рРНК, который позволяет определить таксономические группы (филы), рода и виды микроорганизмов в исследуемых пробах без их выделения и культивирования на питательных средах, тем самым получая наиболее полный состав микробиоценозов (с точностью до $10^{-6}\%$). Все прямые методы микробиологических исследований проводятся в Ресурсном центре Санкт-Петербургского государственного университета под руководством профессора, доктора биологических наук Д.Ю. Власова.

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ В ПОДЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Анализ проведенных исследований в XX–XXI вв. позволил выделить основные источники поступления микроорганизмов в подземное пространство мегаполиса на региональном, локальном и объектном уровнях. При этом важно отметить, что при этом была проведена и градация источников по генезису на природные и природно-техногенные.

К региональным источникам поступления аборигенных (природных) микроорганизмов, развитым повсеместно в пределах Санкт-Петербурга, относятся *болота*, занимавшие до 1703 г. около 70% площади современного города. По мере развития Санкт-Петербурга болота мощностью 2–3 м снимались, а при большей – частично снимались и засыпались песками или строительным мусором. Начиная с 1960-х гг., для подьема уровня земной поверхности на болотные образования намывались пески подводных месторождений Невской губы. В результате к настоящему времени на территории города они погребены под техногенными отложениями. Еще ранними работами было установлено, что инфильтрация болотных вод по разрезу способствует его обогащению органическими соединениями абиотического и биотического генезиса, анаэробными и факультативными микроорганизмами (аммонифицирующими, сульфатредуцирующими, железоредуцирующими, целлюлозоразлагающими, метангенерирующими, водородообразующими и денитрифицирующими бактериями), а также продуктами их метаболизма (газами, кислотами), которые способствуют снижению окислительно-восстановительного потенциала $Eh < 0$ мВ, водородного показателя $pH < 7$ и повышению величины БПК₅ в подземных водах, а также трансформации состава, состояния и свойств грунтов. Негативное воздействие на компоненты подземного пространства наблюдается до глубины более 30 м.

Грунтовые воды, имеющие повсеместное распространение в пределах города, рассматриваются как природно-техногенный источник поступления различных таксонов микроорганизмов в его подземное пространство. Их контаминация происходила при воздействии болотных вод и позднее, в период развития мегаполиса – за счет *утечек из канализационных систем* малой и средней глубины заложения [40]. Кроме того, системы водоотведения представляют собой региональный техногенный источник привноса микроорганизмов, а также органических и неорганических соединений [37, 39]. В зависимости от заложения сетей водоотведения и их состояния канализационные стоки могут оказывать негативное воздействие не только на грунтовые воды, но и на более глубокие водоносные горизонты при определенном гидродинамическом режиме [7].

Опробование грунтовых вод в конце XX–начале XXI вв. в островной части города по 64 режимным скважинам показало, что в большинстве случаев Eh характеризуется отрицательными значениями, достигая самых низких величин на Безымянном и Васильевском островах ($Eh < -127$ мВ), что указывает на преобладание глубоко восстановительной обстановки в подземной среде Санкт-Петербурга [7]. Исследование грунтовых вод в основании ряда архитектурно-исторических памятников (Исаакиевский собор, комплекс зданий Зимнего дворца, Нового Эрмитажа, Биржи и др.) с целью определения их химического состава и агрессивности по отношению к материалам подземных несущих конструкций (фундаментов) указывает на их высокую контаминированность за счет утечек из поврежденной канализационной сети города, что вызывает рост минерализации до 6–7 г/дм³ (в районе комплекса зданий Зимнего дворца). При этом отмечается повышение содержания едких щелочей (Na^+ , K^+), щелочноземельных элементов (Ca^{2+} , Mg^{2+}), хлоридов и сульфатов. Увеличение содержания Ca^{2+} и Mg^{2+} вызвано процессами выщелачивания и разрушения старинных фундаментов (постелистый бут известняка, известковые растворы кирпичной кладки).

Исследование подземных вод с помощью метагеномного анализа 16S рРНК было выполнено в районе Пески, где зафиксирован наиболее длительный период контаминации (более 500 лет) подземного пространства. Основную долю в микробиоценозе составляют анаэробные микроорганизмы, среди которых доминируют водородообразующие бактерии *Hydrogenophaga*; бактерии рода *Pseudomonas* и *Sphingomonas* обычно связаны с техногенными загрязнениями (табл. 1).

Установленное сообщество микроорганизмов способно оказывать негативное воздействие на грунты, их напряженно-деформированное состо-

Таблица 1. Результаты метагеномного анализа грунтовых вод в районе Пески (Ресурсный центр СПбГУ, 2017 г.)

Таксономы (крупные филы)	Доля в пробе, %
Bacteria, Firmicutes, Clostridia, Natranaerobiales, Anaerobranceae	14.7
Bacteria, Proteobacteria, Alphaproteobacteria, Sphingomonadales, Sphingomonadaceae, Sphingomonas	9.5
Bacteria, Proteobacteria, Betaproteobacteria, Burkholderiales, Comamonadaceae	9.3
Bacteria, Proteobacteria, Betaproteobacteria, Burkholderiales, Comamonadaceae, Hydrogenophaga	28.2
Bacteria, Proteobacteria, Gammaproteobacteria, Pseudomonadales, Pseudomonadaceae, Pseudomonas	7.1

Примечание. Таксоны в каждой строке приведены в следующем порядке: царство, фила, класс, порядок, семейство, род.

яние (далее – НДС), а также на конструкционные материалы.

Интересные результаты метагеномного анализа 16S рРНК были получены при исследовании проб грунтовых вод, отобранных в основании Большого драматического театра им. Г.А. Товстоногова (далее – БДТ) в ходе проведения экспертизы причин разрушения гидроизоляции и повышения проницаемости бетонов при углублении подвалов для создания дополнительных помещений. Результаты микробиологических исследований грунтовых вод дают своеобразную картину таксонов микроорганизмов (табл. 2).

Следует отметить, что грунтовые воды в период проведения экспертизы имели рН = 12.25, определенного *in situ* с помощью селективных электродов. В процессе отбора проб бетона при бурении с целью исследования его соответствия заявленной марке по водонепроницаемости был отмечен выброс газоводопесчаной смеси с характерным запахом сероводорода H_2S . Однако известно, что сульфатредуцирующие бактерии функционируют в диапазоне рН от 3–4 до 10. Микробиологические исследования не подтвердили их наличие в грунтовых водах. Однако около 1/3 от общего содержания филы составляют таксоны Dethiobacteria, способные в сильнощелочных условиях продуцировать агрессивный по отношению к бетонам и металлам H_2S . Бактерии группы Babeliae (более 14%) характерны для торфяных

болот (данная территория до основания Санкт-Петербурга была заболочена), мест с высокой концентрацией соединений серы, а также стоков. Следовательно, биоценоз грунтовых вод богат факультативными и анаэробными таксонами микроорганизмов, выступающими биодеструкторами конструкционных материалов.

В 2018 г. после проведения микробиологических исследований к региональным источникам поступления микроорганизмов в подземное пространство города был отнесен *нижнекотлинский водоносный горизонт* – основной в составе вендского водоносного комплекса. Глубина залегания его кровли варьируется от 100 до 130 м. Горизонт характеризуется высокими напорами (>100 м). В некоторых районах Санкт-Петербурга, например, в Приморском районе, его пьезометрическая поверхность приближается к дневной поверхности, в остальных – отмечается на глубине 5–10 м. Исследование химического и микробиологического составов нижнекотлинского водоносного горизонта проводилось на пробах воды, отобранных из эксплуатационной скважины на территории Полостровского завода по разливу минеральных вод, имеющем 3 зоны санитарной охраны, что гарантирует отсутствие загрязнения подземных вод и устойчивость их химического состава. Воды по составу хлоридные натриевые, сухой остаток достигает 4.93 г/дм³, среди микрокомпонентов присутствуют бальнеологические элементы (Br, F, Se, V), повышающие их лечебные свойства. При отборе пробы воды с помощью селективных электродов были замерены Eh = –35 мВ, а также рН = 7.4. Содержания органических соединений: перманганатная окисляемость (далее – ПО) 7.1 мгО₂/дм³, ХПК = 61 мгО₂/дм³ и БПК₅ = 6.3 мгО₂/дм³. Стоит отметить, что о наличии восстановительных условий в водоносном горизонте также указывал слабый запах H_2S , что имеет принципиальное значение при оценке содержания таксонов микроорганизмов. Наличие достаточно богатого микробиоценоза подтверждено метагеномным анализом 16S рРНК (табл. 3).

Весьма интересные результаты по содержанию таксонов микроорганизмов в нижнекотлинском

Таблица 2. Фрагмент результатов метагеномного анализа грунтовых вод в основании БДТ (Ресурсный центр СПбГУ, 2021 г.)

Таксономы (крупные филы)	Доля в пробе, %
Proteobacteria	32.6
Bacteroidia	5.4
Clostridia	6.6
Babeliae	14.6
Dethiobacteria	32.0
Unclassified	1.6
Thermoanaerobacteria	5.6

Таблица 3. Результаты метагеномного анализа образцов вод вендского водоносного комплекса (Ресурсный центр СПбГУ, 2021 г.)

Тахоному (крупные филы)	Доля в пробе, %	Тахоному (крупные филы)	Доля в пробе, %
Proteobacteria	82.39	Omnitrophia	0.75
Campylobacteria	6.15	<i>Desulfovibrionia</i>	0.47
Сyanobacteria	3.93	Unclassified	0.39
Bacteroidia	1.71	Poluanguia	0.35
Actinobacteria	0.98	Clostridia	0.29
Bacilli	0.96	<i>Desulfotomaculia</i>	0.18
<i>Desulfobulbia</i>	0.91	<i>Desulfobacteria</i>	0.16

Примечание. Курсивом отмечены сульфатредуцирующие бактерии, восстанавливающие сульфаты до сульфидов с конечным продуктом реакции H_2S .

водоносном горизонте показали посева на воду и взвеси [8]. Численность микробиоты в воде на 2–3 порядка ниже, чем на твердых частицах взвеси, что объясняется наличием у микроорганизмов приспособительной функции существования и переноса, как правило, на твердых поверхностях. Основные таксоны микроорганизмов, выявленные при посевах: сульфатредуцирующие, железоредуцирующие, восстанавливающие Fe^0 и Fe^{3+} до Fe^{2+} ; аммонифицирующие, водородные, силикатные, в небольшом количестве – тионовые и нитрифицирующие бактерии. Содержание этих форм в воде варьирует в пределах 10^4 – 10^6 клеток/мл; на твердых поверхностях – достигает 10^7 – 10^8 клеток/г [8].

Еще ранее, исследованиями под руководством Р.Э. Дашко было установлено, что под действием высоконапорных вод нижнекотлинского водоносного горизонта наблюдается разрушение несущих обделок перегонных тоннелей метрополитена, более 70% которых проложено в верхнекотлинских глинах верхнего венда. Эти глины представляют собой трещиновато-блочную среду, обладающую водопроницаемостью, которая зависит от интенсивности ее трещиноватости и повышается в зонах тектонических разломов [8, 7]. Кроме того, по данным геотехнического мониторинга, воды этого горизонта в настоящее время взаимодействуют с фундаментами комплекса зданий Лахта-центр [33].

В качестве локальных природных источников поступления микроорганизмов в подземное пространство Санкт-Петербурга можно выделить *межморенные водоносные горизонты: верхний (полюстровский) и нижний*, а также *межморенные миктулинские отложения*.

Полюстровский водоносный горизонт развит на севере и северо-востоке Санкт-Петербурга. Водовмещающими грунтами выступают озерно-ледниковые и флювиогляциальные пески, залегающие между московской и ошашковской моренами. Воды этого горизонта характеризуются как

напорные. В зависимости от глубины залегания величина напоров варьируется от 2 до 38 м, при этом в некоторых зонах при бурении скважин наблюдается самоизлив вод горизонта либо образование грифонов на земной поверхности. Результаты исследования проб воды полюстровского (верхнего межморенного) горизонта, отобранных на Полюстровском заводе, показали, что по составу воды гидрокарбонатные кальциево-натриевые. Величина сухого остатка составляет 468 мг/дм³. Показатели содержания органических соединений: ХПК – 29.0 мгО₂/дм³, ПО – 3.9 мгО₂/дм³, БПК₅ – 3.0 мгО₂/дм³. При отборе проб в полевых условиях с помощью селективных электродов были измерены физико-химические показатели: Eh = –25 мВ и pH = 6.9. На восстановительную обстановку в подземных водах при отборе проб также указывал характерный запах H₂S, выступающий индикатором присутствия сульфатредуцирующих бактерий, наличие которых подтверждено результатами метагеномного анализа 16S рРНК (табл. 4).

Среди выявленных микроорганизмов преобладают факультативно-анаэробные бактерии с различными типами метаболизма. В пробе полюстровского горизонта значительную часть микробиоты составляют железовосстанавливающие бактерии – факультативные анаэробы, которые способны восстанавливать Fe^{3+} до Fe^{2+} , а также развиваться в анаэробных условиях с использованием органических компонентов широкого спектра (ацетата, лактата, пропионата, бензотата и др.). Очевидно, что данные бактерии в бескислородной обстановке могут быть весьма опасны по отношению к железосодержащим конструкциям ввиду их способности восстанавливать железо до формы Fe^{2+} (соединения восстановленного железа растворимы). Наряду с железовосстанавливающими, в полюстровском горизонте в значительном количестве отмечены сульфатредуцирующие и железooksисляющие бактерии. В целом данные метагеномного анализа 16S рРНК

Таблица 4. Результаты метагеномного анализа образцов вод полостровского водоносного горизонта (Ресурсный центр СПбГУ, 2021 г.)

Тахоному (крупные филы)	Доля в пробе, %	Тахоному (крупные филы)	Доля в пробе, %
Proteobacteria	79.07	Gracilibacteria	0.54
Bacteroidia	6.91	Parcubacteria	0.47
<i>Desulfobacteria</i>	4.85	<i>Desulfovibrionia</i>	0.43
Ignavibacteria	1.70	Acidobacteria	0.40
<i>Desulfobulbia</i>	1.41	<i>Desulfirobacteria</i>	0.22
Vampirivibrionia	0.82	Syntrophia	0.22
Dehalococcoidia	0.58	Spirochaetia	0.21
Unclassified	0.56	Прочие (<0.2%)	1.61

Примечание. Курсивом отмечены сульфатредуцирующие бактерии, восстанавливающие сульфаты до сульфидов с конечным продуктом реакции H_2S .

указывают на существование довольно сложного по составу и структуре микробного сообщества, которое может играть заметную роль в процессах биокоррозии подземных конструктивных материалов.

Ввиду высоких напоров верхнего межморенного горизонта при восходящем перетекании вод возможно обогащение вышележащей осташковской морены аборигенными микроорганизмами, что необходимо учитывать при устройстве подземных конструкций и сооружений, особенно выполненных из бетонов и железобетонов, а также металлов.

Нижний межморенный водоносный горизонт распространен в северной и юго-восточной частях Санкт-Петербурга. Воды этого горизонта характеризуются как высоконапорные (величина напоров составляет 20–70 м), что необходимо учитывать при подземном строительстве, в первую очередь, при эксплуатации перегонных тоннелей “Площадь Мужества-Лесная” в связи с возможным развитием биокоррозии несущих обделок. Для определения химического состава нижнего межморенного водоносного горизонта и его микробиологических показателей была отобрана проба из самоизливающейся режимной

Таблица 5. Результаты метагеномного анализа проб нижнего межморенного водоносного горизонта (Ресурсный центр СПбГУ, 2022 г.)

Тахоному (крупные филы)	Доля в пробе, %
<i>Gamma</i> proteobacteria, из них:	75
Thiotrichaceae	7
Pelomonas	3
Massilia	3
Acinetobacter	<1
<i>Alpha</i> proteobacteria	25

Примечание. Курсивом отмечены классы бактерий.

скважины (ул. Байконурская, 12), оборудованной для общего потребления населением в виде галереи. По составу воды пресные гидрокарбонатные кальциевые, сухой остаток составляет 164.0 мг/дм^3 . Показатели содержания органических соединений характеризуются низкими значениями: ХПК = $20.0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$, ПО = $3.6 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$, БПК₅ = $2.3 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$. Кроме того, *in situ* были замерены pH = 8.0 и Eh = –161.2 мВ, что почти в 5 раз ниже, чем в глубоком нижнекотлинском горизонте. Несмотря на столь уникальные условия для развития анаэробных таксонов микроорганизмов, метагеномный анализ 16S рРНК иллюстрирует своеобразие микробиоценоза (табл. 5).

Хотя нижний межморенный водоносный горизонт из-за высоких напоров имеет высокую защищенность от техногенных воздействий, анализ результатов метагеномного анализа 16S рРНК позволяет утверждать обратное. Согласно его результатам, отмечается присутствие даже психрофильных бактерий, которые не характерны для водоносных горизонтов вне зон многолетнемерзлых пород. Аномалии химического состава подземных вод и таксонов микроорганизмов служат показателем высокой техногенной нагрузки на водоносный горизонт. В 1970-х гг. именно в этом горизонте проходилась перегонный тоннель в массиве песков, замороженном с помощью рассольного метода. В 1974 г. произошла авария – прорыв водонасыщенного песка через льдогрунтовое ограждение, что привело к затоплению пройденной выработки. На дневной поверхности образовался глубокий провал, сопровождавшийся разрывом подземных коммуникаций, поступлением загрязненных грунтовых вод и канализационных стоков в подземное пространство. Для ликвидации аварии и проведения дальнейших горнопроходческих работ было выполнено замораживание водонасыщенной грунтовой толщи жидким азотом [4]. Перед этим были сделаны попытки подъема дневной поверхности путем на-



Рис. 1. Процесс утилизации органического вещества микроорганизмами [36].

гнетания воды. Отсюда вполне объяснимо появление психрофильных групп и контаминантов, определяющих генезис микроорганизмов, характерных для зон техногенных загрязнений.

Следующий этап техногенного воздействия на данный водоносный горизонт был в 1994–1995 гг., когда полностью были разрушены гидроизоляция, чугунные тубинги за счет температурных напряжений в замороженной жидким азотом грунтовой толще и частично железобетонная обделка перегонных тоннелей. В результате в перегонный тоннель началось поступление подземных вод, а затем, по мере развития трещин в обделке, и водонасыщенных песков. Под действием гравитационных сил продолжались деформации прогиба тоннеля и обогащение подземных вод продуктами разрушения бетонов и металлов. Впоследствии тоннель был обрезан в местах его выхода из глин венда в зону погребенной долины. В настоящее время эта часть тоннеля находится в подошве водоносного горизонта, продолжая взаимодействовать с водами нижнего межморенного горизонта, тем самым влияя на специфику формирования его биохимических, физико-химических и химических характеристик. Стоит отметить, что опробуемая скважина расположена в 6 км от станции метро “Площадь Мужества”, что дает основание утверждать: результаты химического и микробиологического исследований данного горизонта представляют собой отзвук тех драматических событий, которые развернулись в подземном пространстве в Калининском районе Санкт-Петербурга в 1974–1975 и 1994–1995 гг. Кроме того, объяснимо столь низкое снижение Eh подземных вод: длительное существование льдогрунтового целика с различными технологиями замораживания обеспечивало отсутствие водообмена.

Межморенные микулинские отложения, обогащенные битуминозной органикой (до 20%), распространены преимущественно в восточном, юго-восточном и частично в южном районах Санкт-Петербурга, а также в северных пригородах (Мурино), где залегают на глубинах до 35 м от земной поверхности. Микулинские отложения рассматриваются как природный источник поступления метана (CH_4), а также небольшого количества молекулярного азота (N_2) и диоксида углерода (CO_2) во вмещающие их породы и подземные воды. С потоком газов переносятся анаэробные формы микроорганизмов – метангенерирующие, денитрифицирующие, а при загрязнении микулинских

отложений – и сульфатредуцирующие бактерии. Метаболизм микробиоты этих образований направлен на усвоение и использование битумной органики, что накладывает определенные ограничения на применение материалов, содержащих органические соединения, при проектировании подземных сооружений в районах развития микулинских отложений [7].

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Процессы, развивающиеся в подземном пространстве мегаполиса, вызваны как деятельностью самих микроорганизмов, так и их метаболитами. Жизнедеятельность гетеротрофных подземных микроорганизмов направлена на потребление органических соединений с длиной органической цепи C_{17} – C_{22} , реже до C_{24} . Полициклические образования медленно утилизируются в условиях анаэробной среды и повышенной температуры, комфортной для мезофильных групп микроорганизмов ($t = 29$ – 35°C). Еще ранее было установлено, что биохимическая утилизация органических веществ может быть полной (до образования газов) и неполной (до органических кислот) (рис. 1).

Полная утилизация органических соединений гетеротрофными микроорганизмами протекает в несколько стадий с упрощением структурного строения конечного продукта, при этом каждый газ биохимического генезиса формируется из определенной кислоты.

В практике современных инженерных исследований определение газовой составляющей ведется только в процессе инженерно-экологических изысканий (СП 502.1325800.2021). Газовые съемки ограничиваются весьма небольшой глубиной до 0.8 м в шурфах, а в скважинах при наличии техногенных грунтов на всю их мощность с заглублением в подстилающие отложения на 0.5–1.0 м [1, 22]. В процессе газохроматографического анализа, согласно вышеназванному нормативному документу, определяется содержание CH_4 , CO_2 , молекулярного кислорода O_2 , водорода H_2 и азота N_2 , а наличие H_2S (наиболее опасного газа по отношению к конструкционным материалам) проводится только по требованию заказчика. Стоит отметить, что CH_4 , H_2 и N_2 – газы, характерные только для анаэробных условий, CO_2 – продукт дыхания микроорганизмов, поэтому O_2 может присутствовать только в незначительных ко-



Рис. 2. Макропоры в образцах тиксотропных супесей ледникового генезиса, залегающих над микулинскими газогенерирующими отложениями (фото А.М. Лебедевой).

личествах, его определение не отвечает физико-химическим условиям генерации CH_4 , H_2 , N_2 и H_2S .

По результатам выполненных нами микробиологических исследований, в том числе метагеномного анализа, по всей глубине осадочной толщи подземного пространства Санкт-Петербурга до глубин свыше 100 м (воды глубокого нижнекотлинского водоносного горизонта) повсеместно обнаружены газогенерирующие таксоны микроорганизмов. Следовательно, при решении задач освоения и использования подземного пространства необходимо определение газовой составляющей в зависимости от глубины положения сооружения.

Для прогнозирования опасных последствий биохимического газообразования необходимо учитывать растворимость газов. В пределах рассматриваемых глубин к малорастворимым газам относят CH_4 , H_2 и N_2 , к среднерастворимым — CO_2 , а к хорошо растворимым — H_2S и аммиак (NH_3). Депонирование малорастворимых газов приводит к изменению НДС в грунтовых толщах с малой газопроницаемостью, поскольку пузырьки этих газов сосредоточены в поровом пространстве песчано-глинистых грунтов. Малый размер пор определяет величину диаметра газовых пузырьков и значение их поверхностного натяжения. Согласно закону Лапласа и определениям газодинамики, такие пузырьки относятся к твердым несжимаемым [44]. Гидрофобные пузырьки газа не сорбируются на гидрофильной поверхности твердых частиц, и в процессе их накопления в грунтах наблюдается повышение газодинамического давления. Согласно проведенным замерам в подземном пространстве Санкт-Петербурга, его величина в микулинских отложениях достигала 3 атм. При проходке подземных выработок в таких толщах может наблюдаться выброс водогазонасыщенной смеси, а при наличии CH_4 — самовозгорание газов.

В результате диссипации газов водонасыщенные грунты превращаются в водогазонасыщенные, что приводит к их разуплотнению и появлению макропор в глинистых грунтах (рис. 2). Как уже отмечалось ранее, в газовом потоке происходит перенос микроорганизмов и продуктов их метаболизма, приводящего к вторичному обогащению микробиотой подстилающих и перекрывающих толщ грунтов.

Присутствие газовой составляющей в глинистых грунтах вызывает изменение характера перераспределения давления в тонкодисперсных отложениях. Еще ранее профессор Ю.К. Зарецкий обосновал, что при степени водонасыщения грунтов (S_r) менее 0.95, поровое давление в них не возникает, и все деформации грунтов происходят только за счет проявления свойств ползучести скелета [11].

Изменение НДС толщ при депонировании либо диссипации малорастворимых газов вызывает большие и неравномерные деформации разных знаков перегонных тоннелей Петербургского метрополитена, в кровле которых прослеживаются газогенерирующие микулинские отложения. Анализ деформаций тоннелей дал возможность установить закономерности их развития: 1) подъемы перегонного тоннеля в результате депонирования малорастворимых газов (CH_4 , N_2); 2) оседание, вплоть до просадок, в результате диссипации газов в водонасыщенных дисперсных грунтах (рис. 3).

Средне- и хорошо растворимые газы способствуют преобразованию физико-химических характеристик подземных вод (изменению кислотности среды), а также формированию их агрессивности по отношению к конструкционным материалам.

Расселение микроорганизмов в грунтах необходимо рассматривать в зависимости от степени их литификации. В отложениях малой и частично

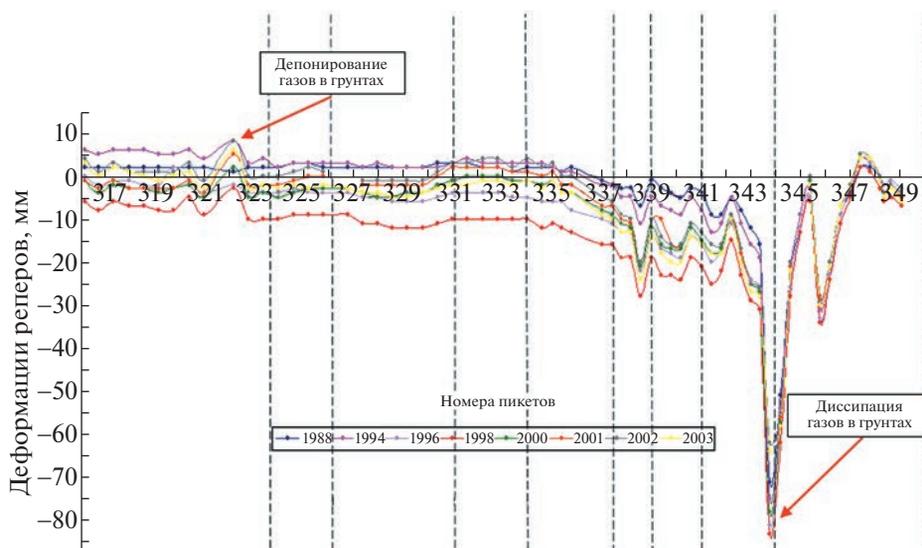


Рис. 3. Развитие деформаций подъема и оседания по трассе перегонного тоннеля (по данным «Ленметрогипротранс», ТОИС).

средней степени уплотнения расселение микроорганизмов происходит в поровом пространстве с образованием биопленок вокруг твердых частиц [24]. В литифицированных трещиновато-блочных грунтах микроорганизмы расселяются по микро- и макротрещинам: величина ММ в трещинах нижнекембрийских синих глин составила 70 мкг/г, а в плотных блоках — только 10 мкг/г, что было на грани точности определения данного показателя по методу М. Бредфорда [7].

Наиболее негативное воздействие оказывают микроорганизмы на состояние и свойства песков, а также некоторых плотных глинистых грунтов — моренных отложений, которые рассматриваются в разрезе Санкт-Петербурга как надежный несущий горизонт для свайных фундаментов. Формирование биопленок на твердых частицах водонасыщенных песков способствует снижению угла внутреннего трения (ϕ), и при отсутствии сцепления (c) наблюдается их постепенный переход в состояние тяжелой жидкости (плывуна). При наличии твердых пузырьков малорастворимых газов, действующих как шарикоподшипники, ϕ песков снижается до нулевых значений. В таких песках статическое зондирование показывает минимальные значения лобового сопротивления.

Жилые и административные здания, возведенные на свайных фундаментах, несущим горизонтом которых служат моренные отложения, испытывают длительные и неравномерные осадки в течение 10 лет и более [42]. Специальные исследования показали, что глинистые морены в восстановительных условиях, залегающие под более молодыми четвертичными отложениями, а также под болотами и хозяйственно-бытовыми свалками,

характеризуются наличием большой численности анаэробных микроорганизмов. Формирование биопленок, а также редукция цементирующих соединений Fe^{3+} приводит к преобразованию структурных связей, что способствует снижению сцепления до 0.04 МПа и менее, а ϕ до $5-7^\circ$. По результатам обратных расчетов модуль общей деформации (E_0) таких морен составляет 3 МПа и менее. Следовательно, подобные морены должны рассматриваться как квазипластичная среда (рис. 4) [7].

Морена, залегающая у дневной поверхности в аэробных условиях, характеризуется высокими ϕ ($15-25^\circ$ и более), а сцепление обычно превышает 0.08 МПа за счет ее цементации гидроксидами железа [7].

Биокоррозия конструкционных материалов — бетонов, железобетонов, металлов, чугунов и др. протекает под влиянием самих микроорганизмов в биопленках на поверхности конструкций и их метаболитов: энзимов, кислот и газов [19, 41].

Как уже отмечалось выше, отрицательные значения Eh подземной среды определяют наличие анаэробных форм микроорганизмов, из них наиболее опасны сульфатредуцирующие, генерирующие H_2S , диссоциация которого в водной среде происходит согласно уравнению [7]:



Накопление H^+ формирует кислую среду, способствующую разрушению гидроксидов кальция и магния в составе цементов, в результате чего наблюдается рост объема пор в бетонах. Кроме того, атомарный водород в силу исключительно малых размеров способен проникать в кристаллическую решетку металла на глубину 30–40 мкм и вступать



Рис. 4. Характер разрушения образцов ошашковской морены в условиях возможности их бокового расширения, отобранных с глубины: а – 16.0–16.4 м; б – 17.8–18.0 м (фото из архива Р.Э. Дашко).

с ним в реакцию с образованием гидридов Me_mH_n , что способствует увеличению объема и разуплотнению поверхностного слоя конструкций [6]. Природа разрушения металлических конструкций под воздействием H_2 (продукта деятельности водородообразующих бактерий) аналогична развитию процесса при накоплении атомарного водорода. Такой процесс называется наводороживанием металлов: он способствует повышению их хрупкости и преждевременному разрушению конструкций [38, 43]. Чугунные конструкции (тюбинги перегонных тоннелей метрополитена) разрушаются под действием железоредуцирующих бактерий, которые переводят железо из Fe^0 в Fe^{2+} с последующим его выносом из обделки. В результате наблюдается процесс графитизации чугуна, сопровождающийся его расслоением и высокой хрупкостью.

Как было показано на рис. 1, утилизация органического вещества анаэробными микроорганизмами приводит к образованию более чем 150 органических кислот, которые активно понижают величину рН подземных вод до 4 и менее и создают условия для коррозии (утончения) металлических конструкций, а также развития питтинга [7].

В аэробных условиях в подземном пространстве активно действуют тионовые, нитрифицирующие и железooksисляющие бактерии. Тионовые таксоны, вырабатывающие серную кислоту, приводят к развитию сульфатной коррозии бетонов при формировании этtringита ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$), генерации кристаллизационного давления за счет его образования более 10 МПа и последующей дезинтеграции бетона [10, 34]. Нитрифицирующие бактерии создают агрессивные для металлов и цементов кислые среды при действии азотной кислоты.

Железобактерии поселяются на стенках увлажненных металлических конструкций с об-

разованием слизистых скоплений. В сформированной железобактериями среде наблюдаются разуплотнение и “вспучивание” металла с формированием гидроксидов железа [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показана роль отечественных специалистов в становлении и развитии междисциплинарной науки – подземной микробиологии. Отражены основные направления деятельности известных ученых: В.И. Вернадского, Г.А. Надсона, Б.Л. Исаченко и других исследователей, которые в своих работах показали важность и необходимость научно-практического изучения деятельности микроорганизмов в различных областях геологии. Подчеркнуто пионерное значение проведения таких исследований московской школой инженерной геологии под руководством академика Е.М. Сергеева. Продемонстрированы результаты применения и внедрения микробиологических методов и методик при исследовании длительной устойчивости и эксплуатационной надежности различных объектов в подземном пространстве Санкт-Петербурга.

2. Изучены основные источники поступления микроорганизмов в подземное пространство Санкт-Петербурга. Среди региональных источников первостепенное значение имеют болота, влияние которых прослеживается на глубину до 30 м и более за счет переноса микроорганизмов, метаболитов, а также абиотических органических компонентов при нисходящей инфильтрации болотных вод. Впервые установлено, что глубокие и хорошо защищенные водоносные горизонты служат источником поступления подземной микробиоты. К региональным источникам микроорганизмов в подземное пространство относятся грунтовые воды, повсеместно контаминированные утечками из систем водоотведения неглубо-

кого заложения. Охарактеризованы локальные источники поступления микроорганизмов, среди которых принципиальное значение имеют межморенные микулинские газогенерирующие песчано-глинистые битуминозные отложения. Показано, что при проходке и эксплуатации подземных сооружений в микулинских отложениях и в грунтах, подстилающих и перекрывающих их, наблюдается активная биокоррозия несущих обделок. К локальным источникам поступления микробиоты в подземную среду города также отнесены верхний (полуостровский) и нижний межморенные водоносные горизонты.

3. Проанализированы наиболее опасные инженерно-геологические процессы в подземном пространстве Санкт-Петербурга, которые развиваются под воздействием различных таксонов микроорганизмов. Особое внимание уделено гетеротрофным анаэробным формам, генерирующим биохимические газы. Депонирование малорастворимых газов оказывает влияние на формирование напряженно-деформированного состояния грунтовых толщ. При диссипации таких газов (CH_4 , H_2 , N_2) водонасыщенные пески переходят в состояние пльвунов, а глинистые грунты – в квазипластичные разности. Накопление микробной массы, состоящей из живых и мертвых клеток, а также продуктов метаболизма приводит к формированию биопленок вокруг минеральных зерен и последующей негативной трансформации прочности и деформационной способности песчано-глинистых отложений. Среди опасных инженерно-геологических процессов отмечена биокоррозия конструкционных материалов, протекающая за счет метаболитов (газов, кислот, ферментов) и непосредственной деятельности микроорганизмов, образующих биопленки на поверхности подземных конструкций. Особенно опасен для подземных конструкций сероводород.

Проведенные исследования деятельности микроорганизмов в подземной среде Санкт-Петербурга, а также на других объектах подтверждают необходимость включения в нормативные документы по инженерно-геологическим исследованиям изучение деятельности подземной микробиоты с целью повышения безопасности освоения и использования подземного пространства городов и горно-промышленных регионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абелев М.Ю., Бахронов Р.Р., Каралли Д.Л.* Особенности устройства оснований зданий на газогенерирующих насыпных грунтах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 7. С. 26–31. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.07.26-31>
2. *Андреюк Е.И., Билай В.И., Коваль Э.З.* и др. *Микробная коррозия и ее возбудители*. Киев: Наук. думка, 1980. 287 с.
3. *Болотина И.Н., Сергеев Е.М.* Микробиологические исследования в инженерной геологии // *Инженерная геология*. 1987. № 5. С. 3–17.
4. *Волохов Е.М., Мукминова Д.З.* Оценка деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей метрополитена способом искусственного замораживания грунтов для стадии формирования ледопородного ограждения // *Записки Горного института*. 2021. Т. 252. С. 826–839. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.5>
5. *Гинзбург-Карагичева Т.Л.* Микробиологические очерки: 1. Нефтяные микробы и возбуждаемые ими биохимические процессы. 2. О бесцветных и пурпурных серобактериях. М., Л.: Гос. науч.-техн. нефт. изд-во, 1932. 96 с.
6. *Голдобина Л.А., Орлов П.С.* Анализ причин коррозионных разрушений подземных трубопроводов и новые решения повышения стойкости стали к коррозии // *Записки Горного института*. 2016. Т. 219. С. 459. <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.3.459>
7. *Дашко Р.Э., Власов Д.Ю., Шидловская А.В.* Геотехника и подземная микробиота. С-Пб.: ПИ Геореконструкция, 2014. 279 с.
8. *Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А.* Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // *Записки Горного института*. 2022. Т. 254. С. 180–190. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.13>
9. *Дашко Р.Э., Романов И.С.* Прогнозирование горно-геологических процессов на основе анализа подземного пространства рудника Купол как многокомпонентной системы (Чукотский автономный округ, Анадырский р-н) // *Записки Горного института*. 2021. Т. 247. С. 20–32. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.3>
10. *Духанина У.Н.* Влияние бактериальных микроорганизмов на развитие биокоррозии бетона // *Вестник науки*. 2023. Т. 5. № 6 (63). С. 472–476.
11. *Зарецкий Ю.К.* Теория консолидации грунтов. М.: Наука, 1967. 270 с.
12. *Звягинцев Д.Г.* Взаимодействие микроорганизмов с твердыми поверхностями. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 176 с.
13. *Исаченко Б.Л.* Геологическая деятельность микробов // *Природа*. 1950. № 8. С. 34–37.
14. *Исаченко Б.Л.* О коррозии бетонов. Избранные труды. 1951. Т II. С. 254–256.
15. *Исаченко Б.Л.* О нитрификации на стенах и о разрушении вследствие этого кирпича. Избранные труды. 1951. Т. I. С. 101–105.
16. *Колотова О.В., Могилевская И.В.* Процессы микробного биоповреждения в подземных горных выработках // *Известия Тульского государственного университета. Сер. Науки о Земле*. 2020. № 2. С. 44–66.
17. *Крамаренко Л.Е.* Геохимическое и поисковое значение микроорганизмов подземных вод. Л.: Недра, 1983. 181 с.
18. *Крисс А.Е.* Жизненные процессы и гидростатическое давление. М.: Наука, 1973. 272 с.

19. Кудина А.В., Сокоров И.О. Коррозия-биотехническая система разрушения технических объектов, снижающая их качество и надежность // Наука и техника. 2020. № 6. С. 512–520.
<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-512-520>
20. Кузнецов С.И. Введение в геологическую микробиологию. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. 239 с.
21. Куликов А.А., Харламова Т.А., Хабарова Е.И. К вопросу оценки влияния микробиологических биоценозов на геологические и геотехнические риски горных предприятий // Уголь. 2022. № 4. С. 67–71.
<https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-4-67-71>
22. Куликова Н.В., Данильев С.М., Ефимова Н.Н. и др. Моделирование данных сейсмомографии и электротомографии для песчано-глинистого разреза с наличием приповерхностных скоплений газа // Мониторинг. Наука и технологии. 2020. № 2 (44). С. 26–30.
<https://doi.org/10.25714/MNT.2020.44.004>
23. Ларионов А.К., Нижерадзе Т.Н., Лаздовская М.А. Выявление природы и степени оглеености глинистых грунтов как результат жизнедеятельности микроорганизмов // Вестник ЛГУ. Сер. 7. 1987. № 4 (№ 28). С. 35–41.
24. Максимович Н.Г., Деменев А.Д., Хмурчик В.Т. Трансформация минерального состава дисперсного грунта в условиях микробиологического воздействия // Вестник Пермского университета. Сер. Геология. 2021. Т. 20. № 1. С. 24–32.
<https://doi.org/10.17072/psu.geol.20.1.24>
25. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н. и др. Коррозия бетона и железобетона, Методы их защиты. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
26. Надсон Г.А. Микроорганизмы, как геологические деятели: О сероводородном брожении в Вейсовом соляном озере и об участии микроорганизмов в образовании черного ила (лечебной грязи). С-Пб.: Тип. П.П. Сойкина, 1903. 98 с.
27. Радина В.В. Патент “Способ закрепления пльвунов”. Заявлено 29.12.1967 (№ 1207196/29–14). Опубликовано 24.05.1972. Бюллетень № 17.
28. Роот П.Э., Хлебникова Г.М., Болотина И.Н. и др. Численность и роль микроорганизмов в грунтах // Инженерная геология. 1982. № 6. С. 72–78.
29. Рубенчик Л.И. Микроорганизмы как фактор коррозии бетонов и металлов. Киев: Изд-во Акад. наук Укр. ССР, 1950. 65 с.
30. Созина И.Д., Данилов А.С. Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 297–312.
<https://doi.org/10.31897/PMI.2023.8>
31. Сторожева М.Е., Денисова Я.В. Биокоррозия подземных сооружений: основные причины и защита конструкций // Ученые Записки Сахалинского государственного университета. 2020. № 15–16. С. 109–113.
32. Таусон В.О. Великие дела маленьких существ. М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР в М., 1948. 116 с.
33. Травиш В.И., Шулятьев О.А., Шулятьев С.О. и др. Анализ результатов геотехнического мониторинга башни “Лахта Центр” // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2019. № 2. С. 15–21.
34. Bryukhanov A.L., Vlasov D.Y., Maiorova M.A., et al. The Role of Microorganisms in the Destruction of Concrete and Reinforced Concrete Structures // Power Technology and Engineering. 2021. V. 54. № 5. P. 609–614.
<https://doi.org/10.1007/s10749-020-01260-5>
35. Dashko R.E., Vlasov D.Yu., Voronov A.S. Negative impact of microorganisms on multicomponent underground space of St. Petersburg: engineering, geological and geotechnical aspects // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. V. 90. № 9001.
<https://doi.org/10.18720/CUBS.90.1>
36. Fonken G.S., Johnson R.A. Chemical oxidations with microorganisms. New York, M. Dekker, 1972, 292 p.
37. Guo B., Liu C., Gibson C., Frigon D. Wastewater microbial community structure and functional traits change over short timescales // Science of The Total Environment. 2019. V. 662. P. 779–785.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.207>
38. Lahme S., Mand J., Longwell J., et al. Severe corrosion of carbon steel in oil field produced water can be linked to methanogenic archaea containing a special type of [NiFe] hydrogenase // Applied and Environmental Microbiology. 2021. V. 87. № 3. P. e01819–20.
<https://doi.org/10.1128/AEM.01819-20>
39. LaMartina E.L., Mohaimani A.A., Newton R.J. Urban wastewater bacterial communities assemble into seasonal steady states // Microbiome. 2021. V. 9. Iss. 1. P. 1–13.
<https://doi.org/10.1186/s40168-021-01038-5>
40. Lebedeva Y., Kotiukov P., Lange I. Study of the Geo-Ecological State of Groundwater of Metropolitan Areas under the Conditions of Intensive Contamination Thereof // J. of Ecological Engineering. 2020. V. 21. Iss. 2. P. 157–165.
<https://doi.org/10.12911/22998993/116322>
41. Little B.J., Blackwood D.J., Hinks J., et al. Microbially influenced corrosion – Any progress? // Corrosion Science. 2020. V. 170. P. 108641.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108641>
42. Loseva E., Osokin A., Mironov D., et al. Specific features of the construction and quality control of pile foundations in engineering and geological conditions of Saint Petersburg // Architecture and Engineering. 2020. V. 5. № 2. P. 38–45.
<https://doi.org/10.23968/2500-0055-2020-5-2-38-45>
43. Narenkumar J., AlSalhi M.S., Prakash A.A., et al. Impact and Role of Bacterial Communities on Biocorrosion of Metals Used in the Processing Industry // ACS Omega. 2019. № 4 (25). С. 21353–21360.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02954>
44. Pereiro I., Fomitcheva Khartchenko A., Petrini L., et al. Nip the bubble in the bud: a guide to avoid gas nucleation in microfluidics // Lab on a Chip. 2019. V. 19. № 14. P. 2296–2314.
<https://doi.org/10.1039/C9LC00211A>

ENGINEERING GEOLOGICAL PROCESSES AS A RESULT OF MICROORGANISMS ACTIVITY (ON THE EXAMPLE OF St. PETERSBURG SUBSURFACE)

R. E. Dashko^{a,#}, A. G. Karpenko^a, and D. L. Kolosova^a

^a*St. Petersburg Mining University, 21st Line 2, St. Petersburg, 199106 Russia*

[#]*E-mail: regda2002@mail.ru*

The history of microbiological research in various geological sciences is analyzed in brief. Development of the doctrine about underground microorganisms and its use in various engineering geological schools is shown on the basis of experimental studies, including modern metagenomic analysis. The primary sources of the microorganisms' penetration into the underground space of St. Petersburg have been identified and systematized according to different principles. The analysis of engineering geological processes as a result of microorganisms and products of their vital activity provides the main aspects that control safety of subsurface exploration and use for various purposes, including the design, construction and operation of underground structures (subway tunnels) at different depths, as well as running deep foundation pits for ground structures. The results of experimental studies of the subsurface microorganisms' activity make it possible to infer that it is necessary to extend engineering geological, hydrogeological and engineering ecological research of the urban underground space in order to assess the hazard of the underground microorganisms' activity and to mitigate emergency cases for engineering structures.

Keywords: *underground space, methods of microbiological research, sources of the microorganisms' penetration, contamination, natural and human activities processes, forecasting*

REFERENCES

1. Abelev, M.Yu., Bakhronov, R.R., Karalli, D.L. [Specific features of arranging bases of buildings on gas-generating bulk soils]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2020, no. 7, pp. 26–31. (in Russian)
2. Andreyuk, E.I., Bilai, V.I., Koval', E.Z. et al. [Microbial corrosion and its pathogens]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1980, 287 p. (in Russian)
3. Bolotina, I.N., Sergeev, E.M. [Microbiological research in engineering geology]. *Inzhenernaya geologiya*, 1987, no. 5, pp. 3–17. (in Russian)
4. Volokhov, E.M., Mukminova, D.Z. [Assessment of deformations upon construction of subway escalator tunnels using artificial freezing of soil for the stage of ice wall formation]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2021, vol. 252, pp. 826–839. (in Russian)
5. Ginzburg-Karagicheva, T.L. [Microbiological essays: 1. Petroleum microbes and the biochemical processes they induce. 2. About colorless and purple thiobacillus]. Moscow, Leningrad, State Sci. and Techn. Oil Publ., 1932, 96 p. (in Russian)
6. Goldobina, L.A., Orlov, P.S. [Analysis of causes of corrosion destruction in underground pipelines and new solutions for increasing corrosion steel's resistance]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2016, vol. 219, pp. 459. (in Russian)
7. Dashko, R.E., Vlasov, D.Yu., Shidlovskaya, A.V. [Geotechnics and subsurface microbiology]. St. Petersburg, Georekonstruktsiya Publ., 2014, 279 p. (in Russian)
8. Dashko, R.E., Lkhmatikov, G.A. [The upper Kotlin clays in St. Petersburg region as a foundation and enclosing medium for unique engineering facilities: the engineering-geological and geotechnical analysis]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2022, vol. 254, pp. 180–190. (in Russian)
9. Dashko, R.E., Romanov, I.S. [Forecasting of mining and geological processes based on the analysis of the underground space of the Kupol deposit as a multicomponent system (Chukotka Autonomous Region, Anadyr district)]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2021, vol. 247, pp. 20–32. (in Russian)
10. Dukhanina, U.N. [Influence of bacterial microorganisms on the development of concrete biocorrosion]. *Vestnik nauki*, 2023, vol. 5, no. 6 (63), pp. 472–476. (in Russian)
11. Zaretskii, Yu.K. [Theory of soil consolidation]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 270 p. (in Russian)
12. Zvyagintsev, D.G. [Interaction of microorganisms with hard surfaces]. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1973, 176 p. (in Russian)
13. Isachenko, B.L. [Geological activity of microorganisms]. *Priroda*, 1950, no. 8, pp. 34–37. (in Russian)
14. Isachenko, B.L. [About concrete corrosion. Selected works]. 1951, Part II, pp. 254–256. (in Russian).
15. Isachenko, B.L. [About nitrification on walls and the resultant destruction of bricks. Selected works]. 1951, Part I, pp. 101–105. (in Russian)
16. Kolotova, O.V., Mogilevskaya, I.V. [The microbial bio-damage processes in the underground galleries]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2020, no. 2, pp. 44–66. (in Russian)
17. Kramarenko, L.E. [Geochemical and prospecting significance of groundwater microorganisms]. Leningrad, Nedra Publ., 1983, 181 p. (in Russian)
18. Kriss, A.E. [Vital processes and hydrostatic pressure]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 272 p. (in Russian)
19. Kudina, A.V., Sokorov, I.O. [Corrosion as a biotechnical system for destruction of engineering structures re-

- ducing their quality and reliability]. *Nauka i tekhnika*, 2020, no. 6, pp. 512–520. (in Russian)
20. Kuznetsov, S.I. [Introduction to geological microbiology]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1962, 239 p. (in Russian)
 21. Kulikov, A.A., Kharlamova, T.A., Khabarova, E.I. [On the issue of assessing the impact of microbiological biocenoses on the geoecological and geotechnical risks of mining enterprises]. *Ugol'*, 2022, no. 4, pp. 67–71. (in Russian)
 22. Kulikova, N.V., Danil'ev, S.M., Efimova, N.N., Kulikov, A.I. [Simulation of seismotomography and electrotomography data for a sand-clay section with the presence of subsurface gas accumulations]. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*, 2020, no. 2 (44), pp. 26–30. (in Russian)
 23. Larionov, A.K., Nizheradze, T.N., Lazdovskaya, M.A. [Identification of origin and gleying degree of clay soils as a result of microbial vital activity]. *Vestnik LGU. Seriya 7*, 1987, no. 4 (28), pp. 35–41. (in Russian)
 24. Maksimovich, N.G., Demenev, A.D., Khmurchik, V.T. [Transformation of mineral composition of dispersed soil under microbiological impact]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2021, vol. 20, no. 1, pp. 24–32. (in Russian)
 25. Moskvina, V.M., Ivanov, F.M., Alekseev, S.N. et al. [Corrosion of concrete and reinforced concrete. Methods of their protection]. Moscow, Stroizdat Publ., 1980, 536 p. (in Russian)
 26. Nadson, G.A. [Microorganisms as geological actors: about hydrogen sulfide fermentation in the Weiss salt lake and about the participation of microorganisms in the formation of black silt (therapeutic mud)]. St. Petersburg, P.P. Soikin Publ., 1903, 98 p. (in Russian)
 27. Radina, V.V. [Method of stabilizing quicksand]. Patent RF, no. 1207196/29–14, 1972. (in Russian)
 28. Root, P.E., Khlebnikova, G.M., Bolotina, I.N. et al. [The number and role of microorganisms in soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 1982, no. 6, pp. 72–78. (in Russian)
 29. Rubenchik, L.I. [Microorganisms as a corrosion factor of concrete and metals]. Kyiv, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR Publ., 1950, 65 p. (in Russian)
 30. Sozina, I.D., Danilov, A.S. [Microbiological remediation of oil-contaminated soils]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2023, vol. 260, pp. 297–312. (in Russian)
 31. Storozheva, M.E., Denisova, Ya.V. [Bio-corrosion of underground structures: main causes and protection of structure]. *Uchenye zapiski Sakhalinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 15–16, pp. 109–113. (in Russian)
 32. Tauson, V.O. [Great deeds of little creatures]. Moscow, Leningrad, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1948, 116 p. (in Russian)
 33. Travush, V.I., Shulyat'ev, O.A., Shulyat'ev, S.O. et al. [Analysis of the result of geotechnical monitoring of “Lakhta Center” tower]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2019, no. 2, pp. 15–21. (in Russian)
 34. Bryukhanov, A.L., Vlasov, D.Y., Maiorova, M.A. et al. The role of microorganisms in the destruction of concrete and reinforced concrete structures. *Power Technology and Engineering*, 2021, vol. 54, no. 5, pp. 609–614.
 35. Dashko, R.E., Vlasov, D.Yu., Voronov, A.S. Negative impact of microorganisms on multicomponent underground space of St. Petersburg: engineering, geological and geotechnical aspects. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2020, vol. 90, no. 9001.
 36. Fonken, G.S., Johnson, R.A. Chemical oxidations with microorganisms. New York, M. Dekker, 1972, 292 p.
 37. Guo, B., Liu, C., Gibson, C., Frigon, D. Wastewater microbial community structure and functional traits change over short timescales. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 662, pp. 779–785.
 38. Lahme, S., Mand, J., Longwell, J., et al. Severe corrosion of carbon steel in oil field produced water can be linked to methanogenic archaea containing a special type of [NiFe] hydrogenase. *Applied and Environmental Microbiology*, 2021, vol. 87, no. 3, pp. e01819–20.
 39. LaMartina, E.L., Mohaimani, A.A., Newton, R.J. Urban wastewater bacterial communities assemble into seasonal steady states. *Microbiome*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 1–13.
 40. Lebedeva, Y., Kotiukov, P., Lange, I. Study of the geoecological state of groundwater of metropolitan areas under the conditions of intensive contamination thereof. *Journal of Ecological Engineering*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 157–165.
 41. Little, B.J. et al. Microbially influenced corrosion—Any progress? *Corrosion Science*, 2020, vol. 170, pp. 108641.
 42. Loseva, E. et al. Specific features of the construction and quality control of pile foundations in engineering and geological conditions of St. Petersburg. *Architecture and Engineering*, 2020, vol. 5, no. 2, pp. 38–45.
 43. Narenkumar, J., AlSalhi, M.S., Prakash, A. et al. Impact and role of bacterial communities on biocorrosion of metals used in the processing industry. *ACS Omega*, 2019, no. 4 (25), pp. 21353–21360.
 44. Pereiro, I., Fomitcheva-Khartchenko, A., Petrini, L. et al. Nip the bubble in the bud: a guide to avoid gas nucleation in microfluidics. *Lab on a Chip*, 2019, vol. 19, no. 14, pp. 2296–2314.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.435.8 (476)

РОЛЬ СУФФОЗИИ В ФОРМИРОВАНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ТЕРРИТОРИИ БЕЛОРУССИИ

© 2023 г. И. А. Красовская¹, А. Н. Галкин^{1,*}, А. И. Павловский^{2,**}, С. В. Андрушко²

¹Витебский государственный университет имени П.М. Машиерова,
Московский пр-т, 33, Витебск, 210038 Беларусь

²Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины,
ул. Советская, 104, Гомель, 246028, Беларусь

*E-mail: galkin-alexandr@yandex.ru

**E-mail: aipavlovsky@mail.ru

Поступила в редакцию 20.06.2023 г.

После доработки 30.08.2023 г.

Принята к публикации 06.09.2023 г.

В статье приведены результаты комплексного изучения условий развития и распространения природной и техногенной суффозии на территории Белоруссии. Отмечено, что в слабонарушенных естественных условиях наиболее благоприятные обстановки развития суффозии сложились в пределах моренных и водно-ледниковых равнин и низин в восточной части страны, а также краевых ледниковых гряд и возвышенностей с покровом лессовых и лессовидных образований, обладающих повышенной пылеватостью, относительно невысокой плотностью скелета грунта, легкой размокаемостью и тиксотропностью, что способствует интенсивному развитию процесса суффозии. Рассмотрены активные природные факторы, условия развития и распространения суффозии, формы ее проявления в массивах лессовых и лессовидных грунтов. Проведен анализ проявлений суффозионного процесса в техногенно нарушенных условиях. На конкретных примерах показано их негативное влияние на функционирование природно-технических систем различного уровня организации. По мнению авторов, создание системы мониторинга за развитием суффозии, как и других экзогенных геологических и инженерно-геологических процессов, позволит получать актуальную информацию о распространении и активности проявления указанных процессов и факторах, их определяющих.

Ключевые слова: суффозия, слабонарушенные природные условия, лессовые и лессовидные грунты, активные природные факторы развития, техногенно нарушенные условия, формы рельефа

DOI: 10.31857/S0869780923050053, EDN: ANVTQM

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия процесс суффозии стал привлекать все более пристальное внимание широкого круга специалистов, изучающих взаимодействие человека с геологической средой. Несмотря на то что проявления суффозии встречаются практически повсеместно, в силу ряда причин роль этого процесса длительное время недооценивалась. В настоящее время отношение к проблеме инженерно-геологического изучения суффозии стало заметно меняться в связи с необходимостью хозяйственного освоения суффозионно-опасных территорий и с резко возросшей техногенной активизацией процесса [3, 22].

В понятие “суффозия” разные исследователи вкладывают неоднозначный смысл. Впервые этот термин был предложен в конце XIX в. А.П. Павловым [19], который обозначал им разрушение или растворение минеральных частиц горных по-

род подземными водами. Однако растворение грунтов подземными и поверхностными водами в современной трактовке получило название “карстовый процесс”. Поэтому определение А.П. Павлова слишком широко трактует понятие процесса суффозии.

Большинство специалистов под *суффозией* понимают процесс *механического выноса мелких частиц из слоя дисперсного грунта, слагающего грунтовую толщу или выполняющего роль заполнителя трещин и полостей в скальных или полускальных грунтах, фильтрационным потоком подземных вод.*

Данному процессу подвержены преимущественно пылеватые и мелкозернистые пески, лессовые и реже пылегато-глинистые грунты. В глинах, не имеющих крупных сообщающихся друг с другом пор, внутренний размыв грунта может происходить по трещинам, образующимся в результате процесса выветривания, или по ходам

землеройных животных и корневой системы древесной растительности.

К числу основных причин и условий ее развития следует отнести: 1) структурно-текстурную неоднородность грунтов, при которой возможны передвижение более мелких частиц среди более крупных и их вынос; 2) определенную гидродинамическую силу подземного потока; 3) наличие областей выноса мелких частиц, переносимых потоком. Согласно В.Д. Ломтадзе [10], среди показателей, обуславливающих интенсивность развития суффозии, следует выделить критические градиенты и давление воды, при которых начинается процесс. В естественных условиях интенсивность процесса в значительной степени будет зависеть от характера проницаемости среды протекания процесса. При наличии в грунтовой толще сквозных подземных каналов, соединяющих источник поступления воды со свободным пространством, суффозия будет принимать вид подземной эрозии [8].

По условиям проявления в массиве грунтов различают суффозию контактную и внутрипластовую. При контактной суффозии происходит проникновение мелких частиц, выносимых фильтрационным потоком из одного слоя в толщу другого, контактирующего с ним. Внутрипластовая суффозия выражается в переносе мелких частиц внутри слоя или выносом всей массы грунта, вмещающей фильтрационный поток, который развивается, как правило, вдоль ослабленных зон – трещин, контактов с другими породами и др. [2]. При этом транспортируемый подземным потоком материал может либо аккумулироваться в порах, трещинах и полостях грунтовых массивов, либо выноситься на земную поверхность.

Проявления суффозии весьма разнообразны. Они могут быть как поверхностными (или открытыми), так и подземными (или закрытыми). Поверхностные проявления четко выражены в рельефе и легко поддаются идентификации. В зависимости от строения земной поверхности они принимают различные формы и могут быть как аккумулятивными (конусы суффозионного выноса), так и деструктивными (поноры, провалы, впадины, блюдца, воронки, западины и т.д., на склонах – ниши, обрушение свода которых часто способствует возникновению оползней) [4].

Подземные проявления – это, по сути, структурные элементы массива грунтов. В зависимости от морфологии и происхождения В.П. Хоменко выделяет четыре их типа [24]: полости (пещеры, тоннели), псевдоплавунные зоны, зоны разуплотнения и зоны дезинтеграции.

В естественных условиях суффозия развивается сравнительно медленно (годы, десятки лет), тогда как под влиянием техногенных факторов ее скорость резко возрастает. Наиболее интенсивно

она протекает на участках сосредоточенной фильтрации в районах возведения плотин или водохранилищ, при длительных откачках подземных вод из открытых и подземных горных выработок, прорывов водопроводных и канализационных сетей и т.д.

На территории Белоруссии суффозия – один из довольно распространенных экзогенных геологических и инженерно-геологических процессов. Ее изучением в разные годы занимались Г.А. Колпашников [7], О.П. Корсакова [8], Е.А. Кухарик [10], А.В. Матвеев, Л.А. Нечипоренко [12–14, 19], В.М. Мотуз [15, 16], А.И. Павловский [21] и др. Работы этих авторов посвящены в большей части исследованиям факторов развития и распространения суффозионного процесса в слабонарушенных природных условиях, суффозионных форм рельефа и механизма их образования. При этом техногенной суффозии и ее проявлениям на территории страны, особенно в городах, уделено крайне мало внимания.

Целью данной работы является комплексное изучение условий развития и распространения природной и техногенной суффозии, а также основных форм ее проявления на территории Белоруссии.

Работа базируется на анализе фактического материала, собранного и обработанного авторами более чем за 30-летний период, на основе использования данных собственных натурных наблюдений за развитием суффозии и других экзогенных процессов, аэрофото- и космических снимков, литературных и других открытых источников информации, фондовых материалов различных геологических организаций.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ СУФФОЗИОННОГО ПРОЦЕССА В СЛАБОНАРУШЕННЫХ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ

В слабонарушенных природных условиях на территории Белоруссии наиболее благоприятные обстановки развития суффозии сложились в пределах районов с покровом лессовых и лессовидных образований, широко распространенных в восточной части страны на плоских водоразделах Днепра, Березины и Сожа, а также на склонах Минской, Новогрудской и Оршанской возвышенностей, Копыльской и Мозырской гряд и в некоторых других местах (рис. 1) [3, 12–14].

Представлены эти образования преимущественно лессовидными грунтами (типичные лессы прослеживаются лишь на небольших участках); подстилаются разнообразными по строению и составу моренными, флювиогляциальными, озерно-ледниковыми, аллювиальными, озерными и другими генетическими типами отложений четвертич-

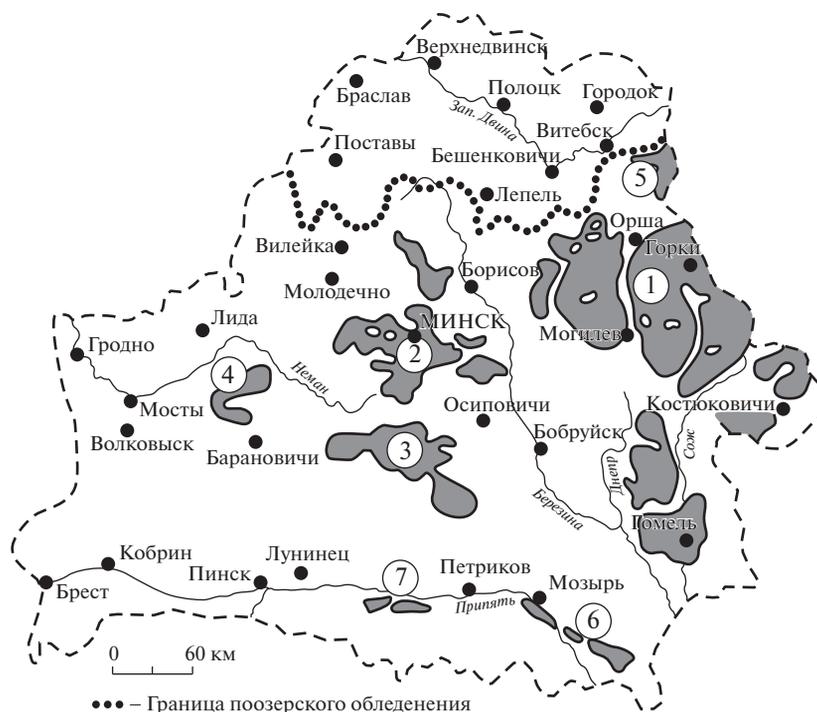


Рис. 1. Основные районы распространения лессовых и лессовидных грунтов на территории Белоруссии [9]: 1 – Оршанско-Могилевский; 2 – Минский; 3 – Слуцкий; 4 – Новогрудско-Кореличский; 5 – Лиозненский; 6 – Мозырско-Хойникско-Брагинский; 7 – Туровский.

ной толщи. Мощность лессовых и лессовидных грунтов обычно небольшая и изменяется от 0.5 м на повышенных участках до 10 м и более в нижних частях склонов, в котловинах, ложбинах стока и других понижениях рельефа. На отдельных участках их мощность может увеличиваться в направлении от I надпойменной террасы в сторону водораздельного плато [2, 16].

Лессовидные грунты часто слоистые и на глубину до 1.0–1.5 м обычно изменены почвенными процессами. По литологическому составу они весьма неоднородны, представлены преимущественно пылеватыми супесями и легкими суглинками палево-желтого или палево-бурого цвета, иногда встречаются пылеватые лессовидные пески и пылеватые слабо облессованные глины [2]. В некоторых разрезах лессовидных отложений отмечались прослойки мелко- и разнозернистого песка, единичные зерна гравия, окатанная галька и даже мелкие валуны (до 10–15 см в поперечнике) из изверженных и осадочных пород [16].

Одним из главных признаков, выделяющих лессовые и лессовидные образования на территории Белоруссии среди других литолого-генетических типов отложений, является преимущественно пылеватый состав (содержание пылеватых частиц в них колеблется от 52 до 88%). В отличие от озерно-ледниковых отложений, которые также богаты пылеватыми частицами, в лессах и лессовид-

ных грунтах все размерные фракции распределены относительно равномерно по всей толще [2].

Естественная влажность рассматриваемых грунтов, сильно зависящая от времени года, климата, рельефа и других факторов, варьирует в интервале 9–25%, преобладают значения 12–20%, степень влажности колеблется от 0.30 до 0.98. Плотность грунта при естественной влажности обычно изменяется от 1.50 до 2.20 г/см³, плотность скелета – 1.53–1.73 г/см³. Наиболее характерное значение плотности скелета для данных грунтов составляет 1.63–1.64 г/см³. Их пористость изменяется от 32 до 55%, коэффициент пористости – от 0.40 до 1.00 (в среднем 0.70) [2, 3]. Нередко в грунтах можно наблюдать хорошо выраженные макропоры в виде пустот размером, превышающим размер минеральных частиц. Часть пор унаследована от растительных остатков и корней, иногда пористость увеличивается за счет ископаемых почв. Чаше отмечаются неправильные округлые и удлиненные поры, встречаются шести- и четырехугольные. Иногда удлиненные поры, соединяясь, формируют цепочки и системы. Их стенки нередко бывают рыхлыми, слабо сцементированными или уплотненными за счет гидрослюдистого или карбонатного цемента. По водопроницаемости рассматриваемые грунты относятся к полупроницаемым (коэффициент фильтрации 0.3–1.2 м/сут); из-за повышенной

пылеватости и относительно невысокой плотности скелета грунта они обладают легкой размокаемостью и тиксотропностью, способствующими интенсивному развитию суффозии [2].

Наряду со специфическими свойствами лессовых и лессовидных грунтов, большое влияние на формирование суффозии в стране оказывают гидрогеологические условия. Так, исследованиями О.П. Корсаковой [8] установлено, что в лессовидных толщах на территории Белоруссии грунтовые воды обычно залегают в нижней части разреза, часто в виде линз. Водоупором для них служат в основном глинистые грунты сожской морены. Глубина залегания грунтовых вод колеблется от 0.2 до 7.0 м, в среднем — 1–2 м, и зависит в значительной степени от мощности грунтовой толщи и геоморфологической обстановки, определяющей характер инфильтрации атмосферных осадков вглубь массива; наличия эрозионного вреза или мест разгрузки грунтовых вод, где в первую очередь происходит формирование суффозионных форм рельефа.

Согласно натурным наблюдениям установлено, что на склонах речных долин, в местах пересеченного рельефа с крутыми короткими склонами преобладает площадной сток, что способствует в период обильного снеготаяния и ливней интенсивному проникновению влаги вглубь массива в значительном количестве [8, 21]. Высокий суффозионный потенциал при таких условиях часто реализуется в образовании подземных и связанных с ними поверхностных форм рельефа. Их возникновение, как правило, сопряжено с большой скоростью сформированного в подземных руслах грунтового водного потока (до нескольких десятков м/сут). Режим таких вод носит кратковременный характер, он полностью определяется климатическими условиями конкретной территории.

На повышенных же участках междуречий, для которых характерен пологоволнистый сглаженный рельеф с небольшим колебанием относительных высот, условия фильтрации спокойные; на значительных территориях просачивание воды вследствие неравномерного ее распределения идет медленно, сопровождаясь иссушением склонов и переувлажнением понижений. В таких условиях обычно происходит формирование поверхностных форм суффозионного рельефа.

Нередко на участках распространения массивов лессовых и лессовидных грунтов геоморфологическая обстановка способна затруднить или исключить разгрузку подземных вод, что можно наблюдать, к примеру, на приводораздельных территориях. В таких случаях образование поверхностного суффозионного рельефа будет уже связано со структурными изменениями в грунтах

под действием инфильтрационного водного потока [8].

В естественных условиях на формирование и режим грунтовых вод в лессовых и лессовидных грунтах Белоруссии значительное влияние оказывают также климатические факторы, прежде всего режим атмосферных осадков. Данные режимных наблюдений в бассейне р. Днепрец Горечкой равнины в условиях суффозионного рельефа свидетельствуют о том, что формирование и питание грунтовых вод в лессовых грунтах происходит в понижениях, в которых зимой происходит перераспределение снежного покрова в результате метелевого переноса, а летом влаги в результате перераспределения площадного стока [8]. Установлено, что грунтовые воды появляются в апреле после снеготаяния, и уровень их постепенно понижается при незначительных колебаниях в зависимости от количества атмосферных осадков. При этом понижение происходит тем стремительнее, чем лучше условия поверхностного и подземного стока.

Через перераспределение площадного стока проявляется влияние растительности на режим грунтовых вод. Сведение лесов и распашка территории приводят к значительному увеличению количества влаги, достигшей поверхности земли. Грунтовая толща насыщается водой в большей степени и на большую глубину, чем под пологом леса. Кроме того, происходит усиление площадного стока, что способствует накоплению влаги в понижениях рельефа.

Совместное действие перечисленных выше факторов на развитие процессов суффозии на территории Белоруссии обусловило образование специфических, часто взаимосвязанных и взаимообусловленных форм рельефа. Наиболее типичными из них являются западины и блюдца — неглубокие, овальной или грушеобразной, часто округлой формы понижения (рис. 2), возникающие в результате неравномерного распределения влаги в толще лессовидных грунтов, сопровождающегося иссушением склонов и переувлажнением понижений. Их относительная глубина составляет 0.1–1.5 м, иногда 3.0 м; площадь колеблется от 100 до 20000 м² при диаметре (или ширине вытянутых форм) от 30 до 120 м. Реже образуются небольшие ложбинообразные понижения длиной 2–3 м и шириной 0.2–0.8 м [12]. Причем их формирование происходит, как правило, при неглубоком залегании грунтового водоносного горизонта вблизи вскрытых эрозионных форм. Если же уровень грунтовых вод устанавливается на глубине более 5 м, то образуются суффозионные депрессии.

Западины часто располагаются в виде цепочек по плоским тальвегам, иногда объединяются в массивы (см. рис. 2). Их количество и размер



Рис. 2. Суффозионный рельеф западной части Горецкой моренной равнины с краевыми ледниковыми образованиями (Оршанский район Витебской области) [22].

устанавливаются в прямой зависимости от мощности лессовой толщи. 70% общей площади западин приходится на участки с мощностью лессовых и лессовидных грунтов более 4 м [3].

Наряду с мощностью грунтов значительное влияние на интенсивность образования суффозионных форм оказывает и рельеф. В частности, западины отсутствуют на плоских поверхностях с превышениями до 2 м, а также на коротких крутых склонах Мозырской гряды и отдельных участков Минской и Новогрудской возвышенностей. На юго-востоке Минской возвышенности, в пределах Хойникской, Стрешинской, Чечерской и некоторых других моренных и водно-ледниковых равнин и низин из-за малой мощности (1 м и менее) лессовидных грунтов проявление процессов суффозии характеризуется слабой интенсивностью, поэтому количество западин здесь относительно невелико — до 2 шт./км². Наибольшая же плотность суффозионных форм (70–80 шт./км² и более) приурочена к районам с волнистым и пологоволнистым рельефом и более мощным чехлом (до 10 м) лессовидных пород. Такие условия для развития суффозионных процессов благоприятно сложились в восточной части Могилевской водно-ледниково-моренной и на Горецкой моренной с краевыми ледниковыми образованиями равнинах [2, 8].

Следует отметить, что в естественных условиях суффозионные западины часто закустарены и за-

болочены, обрамлены преимущественно березо-ивняковыми зарослями, а в центре заняты осоковыми, осоково-злаковыми и разнотравными ассоциациями. Возраст подавляющего их большинства около 150–200 лет [10], единично (в основном в пределах Могилевской и Горецкой равнин) встречаются западины возрастом 1000–1500 лет, который был установлен по мощности накопившегося в них торфа (1.0–1.5 м) [8]. В целях хозяйственного освоения территории с развитием подобных форм рельефа малопригодны, попытки их мелиорации не принесли каких-либо положительных результатов.

Нередко на склонах оврагов, балок и речных долин встречаются суффозионные циркообразные ниши (рис. 3а). Наиболее ярко эти формы проявляются в овражно-балочных системах Мозырской и Новогрудской возвышенностей, реже их можно наблюдать в долинах рек в пределах Оршанской возвышенности и Могилевской равнины. Они не отличаются крупными размерами и в поперечнике не превышают 4–5 м [2].

На участках, где мощность лессовых и лессовидных толщ значительна (более 5 м), с поверхностными суффозионными формами тесно связаны подземные, которые в совокупности образуют единый комплекс форм суффозионного рельефа. Их морфология обязана преимущественно действию водного потока, сосредоточенного в руслах внутри грунтового массива. В геоморфологическом плане

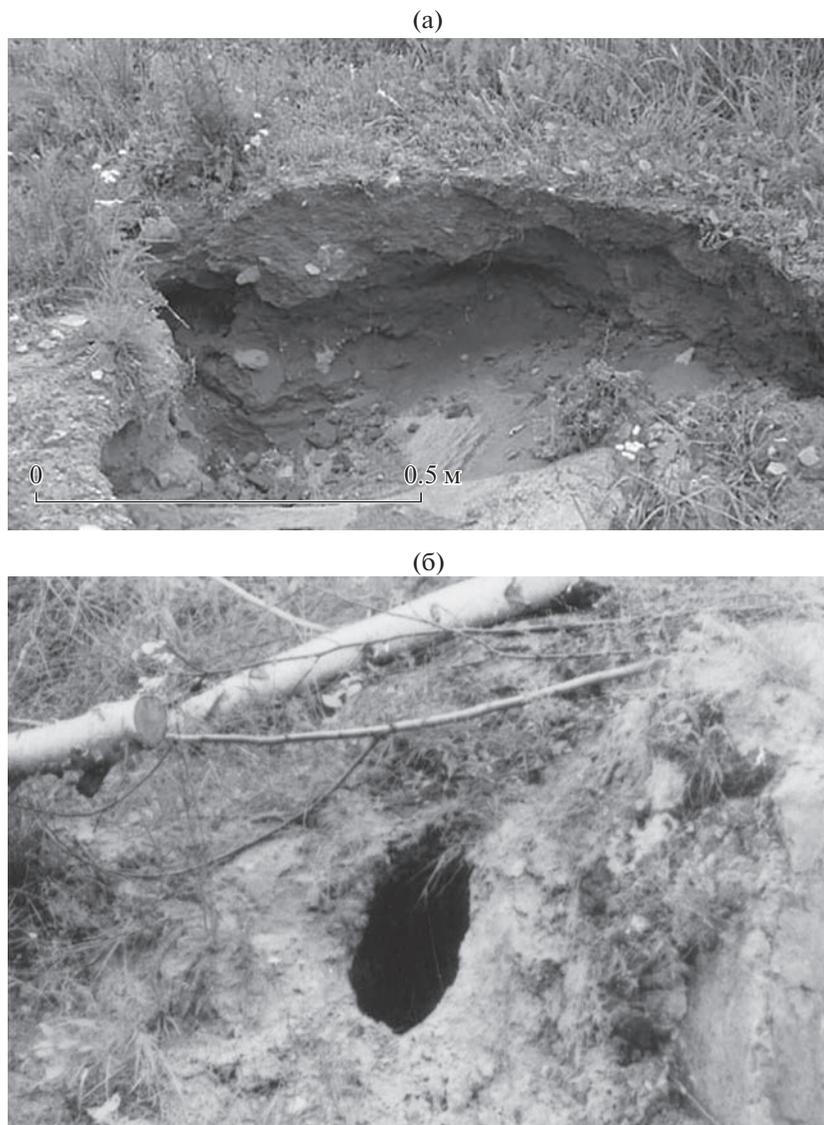


Рис. 3. Суффозионные формы рельефа: а – ниша на склоне оврага Гапеевский в г. Витебск; б – колодец в вершине оврага в г. Мозырь Гомельской обл., с диаметрами входного отверстия 0.5–0.8 м, донной части – 1.2–1.7 м и глубиной 2.8 м (фото А.Н. Галкина, 2008; А.И. Павловского, 1993).

этот комплекс приурочен к относительно глубоким эрозионным врезам – обрывистым берегам рек, молодым крутосклонным оврагам, иногда к крупным карьерным выработкам, дорожным выемкам и другим отрицательным формам рельефа. Наибольшее распространение он получил в пределах Оршанской, Новогрудской и Мозырской возвышенностей.

Среди подземных форм данного комплекса выделяют: входные, транспортные и остаточные формы. Наиболее часто встречаемая входная форма, занимающая в комплексе верхнее положение, – это поноры. Их глубина составляет 0.4–0.7 м при диаметре от 0.2 до 0.5 м.

Из других входных форм суффозионного рельефа выделяются воронки, колодцы и шахты. Колодцы отличаются от воронок отвесными

стенками, размерами (их глубина равна диаметру или несколько превышает его), расположением понор преимущественно в боковых стенках (в воронках поноры размещаются на дне), а также более широким распространением (см. рис. 3б). На территории Белоруссии воронки – редко встречаемая форма.

Единично отмечены и шахты, которые образуются в результате размыва глубоких вертикальных путей фильтрации. Соотношение глубины и диаметра у них различается в 5 и более раз [8]. Такие длинные пути фильтрации не свойственны массивам лессовых грунтов Белоруссии и встречаются довольно редко.

Следует отметить, что каждая из входных форм может развиваться самостоятельно. Если в этом развитии намечается последовательность,

то первичной является воронка. Она может впоследствии трансформироваться либо в колодец, либо в шахту.

Характерной особенностью морфологии суффозионного рельефа, развивающегося в лессовых и лессовидных грунтах страны, является наличие тоннелей и пещер — транспортных подземных форм. Развитие тоннелей происходит, как правило, внутри массива по падению поверхности склонов. На их присутствие указывают слепые обрывы, свидетельствующие о том, что ниже по направлению базиса эрозии осуществляется подземный сток по каналам и ходам, являющимся элементарными разновидностями тоннелей. Ходы отличаются от каналов меньшими размерами, расположением в непосредственной близости от поверхности и тем, что могут закладываться не только в сторону падения склона, но и в противоположную. На поверхности тоннели обнаруживаются только после вскрытия их эрозионной формой, например, оврагом (рис. 4). Пещеры развиваются в непосредственной близости к обрыву вдоль крупных трещин в результате локального изменения силы воздействия грунтового потока в наиболее ослабленных зонах. Для них всегда характерна щелевидная форма. Причиной их появления является обрушение блока породы в стенках обрывов.

Суффозия, сопровождаемая процессами линейного размыва и обрушения, нередко приводит к образованию остаточных форм рельефа, среди которых выделяются останцы и арки. На территории Белоруссии они получили распространение на участках развития лессовидных грунтов значительной мощности (свыше 3 м) в верховьях оврагов и на обрывистых берегах рек. Их образование и длительность существования определяются главным образом режимом и количеством атмосферных осадков.

В заключение отметим, что наличие подземных форм суффозионного рельефа довольно сильно осложняет инженерное освоение территории и требует специальных инженерно-геологических исследований.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ СУФФОЗИОННОГО ПРОЦЕССА В ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Суффозия, развивающаяся в техногенно нарушенных условиях (например, на урбанизированных территориях, участках гидротехнических сооружений, в береговой зоне водохранилищ и т.д.), заслуживает особого внимания, поскольку ее проявления по своей интенсивности и причиненному ущербу часто превосходят природную.



Рис. 4. Овраг на склоне балки в урочище “Булавки” Мозырского района Гомельской обл., сформировавшийся в результате провалов над суффозионными каналами (фото А.И. Павловского, 1993).

Утечки из водонесущих коммуникаций в городах, вскрытие водоносных горизонтов горными выработками, работа дренажных систем и водозаборных скважин способствуют активному развитию процессов суффозии, сопровождаемых образованием различных депрессий, воронок, пещер, провалов и т.д. Причем образовываться эти формы могут в толщах дисперсных грунтов разного литологического состава: песчано-гравийного, песчаного, песчано-глинистого или глинистого.

Довольно быстро образуются суффозионные провалы при авариях водопроводных и канализационных систем, когда вода вырывается из труб под высоким давлением. В этом случае струйный размыв грунта способен приобретать опасный и ущербнонасящий характер, распространяется по всем подземным полостям и сопровождается интенсивным выносом дисперсных частиц. Формирующиеся при этом пустоты мгновенно обрушаются (рис. 5).

К примеру, в марте 2000 г. в районе дома № 45 по ул. Максима Горького в г. Витебск из-за прорыва канализационного коллектора, залегающего в техногенной песчаной толще на глубине 3.5 м, под трамвайными путями образовалась воронка глубиной около 1 м и площадью более 2.5 м². В результате движение трамваев было парализовано на три часа до устранения аварии [4].

Утром 10 марта 2014 г. в Минске по ул. Могилевской также из-за прорыва канализационного



Рис. 5. Прорыв водопроводной трубы, вызвавший суффозионный размыв грунта (а), и его последствия вблизи Ледового дворца в Гомеле, 2013 г. (б) [6].

коллектора, расположенного в толще техногенных песчано-глинистых грунтов на глубине более 3 м, под асфальтовым покрытием автомобильной дороги образовалась суффозионная воронка глубиной более 2 м и площадью 16 м². В результате движение транспорта было парализовано до вечера того же дня, пока коммунальные и дорожные службы не выполнили все необходимые ремонтные работы. Позднее в Минске крупные суффозионные провалы фиксировались на пересечении улиц Клары Цеткин и Мясникова (2016), на улицах Кирова (2017), Фабричной (2018) и в других местах.

Подобные аварийные ситуации случались в разные годы также в Бресте, Гомеле, Гродно, Жлобине, Могилеве и других городах страны. Так, в декабре 2013 г. в одном из дворов по ул. Луцкая в г. Брест в результате суффозии из-за прорыва водопроводной сети образовалась промоина глубиной более 1 м и площадью около 5 м². Два легковых автомобиля оказались в этой промоине [4]. В отдельных случаях суффозионные провалы способны провоцировать аварийность целых зданий, как это было установлено для некоторых домов в г. Могилев по ул. Любчанского [13].

Благоприятные условия для протекания суффозии создаются в процессе строительства и эксплуатации различных инженерных сооружений в городах, крупных автомобильных дорог, когда осуществляется отсыпка песчаных и крупнообломочных пород на слабопроницаемое основание, перекапывание глинистых грунтов, создание поверхностей контакта грунта с различными искусственными материалами и многое другое. В качестве примера можно привести сложившуюся ситуацию на участке автодороги Орша—Смоленск, когда при прокладке газопровода из-за суффозионного выноса массы песка из-под дорожного полотна возник крупный провал, повлекший аварию грузового автомобиля и, как следствие, причинение тяжкого вреда здоровью водителя и пассажира [7].

Довольно часто в городах в грунтах отсыпки суффозия приводит к деформациям тротуаров, отмоستков, лестниц (рис. 6). Причем активно это происходит, как правило, после выпадения значительного количества атмосферных осадков, что, с одной стороны, повышает уровни подземных вод, а с другой — увеличивает расход воды в ливневой канализации и, соответственно, объем утечек из нее. Показательным примером может служить ситуация, возникшая в июле 2011 г. на проезжей части и тротуаре по ул. Ленина вблизи летнего Амфитеатра в Витебске, когда из-за прорыва переполненного ливневой водой канализационного коллектора образовался провал диаметром и глубиной около 1.5 м (см. рис. 6а). В мае 2012 г. почти на этом же месте при аналогичных обстоятельствах авария повторилась (см. рис. 6б) и привела к несчастному случаю — провалилась девушка и с переломами конечностей была госпитализирована в больницу [5].

Нередко суффозионные процессы в пределах территории страны можно наблюдать на отдельных участках гидротехнических сооружений: дамб, плотин, мелиоративных каналов и т.д., в береговых зонах Вилейского, Заславского и др. водохранилищ, а также в бортах карьеров по добыче строительных материалов (например, месторождения “Крапужино”, “Веснянка”, “Узборье”, “Киржи” в Минской области), на территориях крупных промышленных предприятий и объектов энергетики [4].

Резюмируя вышесказанное, следует отметить, что для предупреждения и ликвидации последствий техногенно обусловленной суффозии требуются значительные материальные затраты, связанные не только с проведением инженерных изысканий, специальных обследований, разработкой проектов работ по ремонту водонесущих коммуникаций, дорожных покрытий, восстановлению и укреплению грунтовых оснований зданий и сооружений, бортов карьеров, мелиоратив-



Рис. 6. Деформации тротуаров, вызванные суффозией, в: а, б – Витебске вблизи летнего Амфитеатра (2011 и 2012); в – Гомеле вблизи парка “Фестивальный” (2020); г – Бресте на перекрестке улиц Мицкевича и Куйбышева (2020) [1, 5, 17, 18].

ных каналов и т.д., но и с проведением непосредственно самих работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суффозионные процессы в последние два десятилетия стали одним из осложняющих факторов формирования инженерно-геологических условий отдельных территорий Белоруссии, особенно в крупных городах. В то же время следует отметить, что какие-либо специализированные наблюдения за их проявлением, как и любых других экзогенных геологических и инженерно-геологических процессов, в стране давно не проводятся. Создание системы мониторинга экзогенных геологических и инженерно-геологических процессов локального и регионального уровней позволило бы обеспечить получение актуальной информации о распространении и активности проявления указанных процессов, в том числе суффозионных, и факторах, их определяющих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будьте внимательнее. Яму у парка “Фестивального”, в которую несколько дней назад провалилась девушка, огородили. <https://imag.one/news/budte-vnimatelnee-yamu-u-parka-festivalnogo-1/2673069>.
2. *Галкин А.Н.* Инженерная геология Беларуси. В 3 ч. Ч. 1. Грунты Беларуси / Под ред. В.А. Королева. Витебск: ВГУ им. П.М. Машерова, 2016. 367 с.
3. *Галкин А.Н., Матвеев А.В., Жогло В.Г.* Инженерная геология Беларуси. Основные особенности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий и история их формирования. Витебск: ВГУ им. П.М. Машерова, 2006. 208 с.
4. *Галкин А.Н., Матвеев А.В., Павловский А.И., Санько А.Ф.* Инженерная геология Беларуси. В 3 ч. Ч. 2. Инженерная геодинамика Беларуси / Под ред. В.А. Королева. Витебск: ВГУ им. П.М. Машерова, 2017. 452 с.
5. Девушка провалилась под землю в центре Витебска. [Uhttps://news.tut.by/accidents/288712.html](https://news.tut.by/accidents/288712.html).

6. Из-за “гейзера” провалился тротуар у Ледового дворца. <https://gomelnews.onliner.by/2013/08/17/groval?ysclid=1is1te88kq938164566>.
7. *Колпашиков Г.А.* Инженерная геология. Минск: Технопринт, 2005. 132 с.
8. *Корсакова О.П.* Геоморфологическая роль суффозии в лессовых породах Белоруссии: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1990. 23 с.
9. *Лукашю К.І., Стэцко У.У.* Геаграфічныя асаблівасці распаўсюджання лессавых парод на тэрыторыі Беларусі // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1958. № 4. С. 94–105.
10. *Кухарик Е.А.* Особенности проявления современных карстовых и суффозионных процессов на территории Центральной Беларуси // Літасфера. 2022. № 2 (57). С. 94–100.
11. *Ломтадзе В.Д.* Инженерная геология. Инженерная геодинамика. Л.: Недра, 1977. 479 с.
12. *Матвеев А.В., Нечипоренко Л.А.* Особенности проявления и взаимодействия современных геологических процессов на территории Беларуси // Веснік Брэсц. ун-та. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб Зямлі. 2011. № 1. С. 91–99.
13. *Матвеев А.В., Нечипоренко Л.А.* Последствия проявления опасных геологических процессов на территории Беларуси // Природопользование. 2016. Вып. 29. С. 30–37.
14. *Матвеев А.В., Нечипоренко Л.А., Павловский А.И. и др.* Современная динамика рельефа Белоруссии. Минск: Навука і тэхніка, 1991. 102 с.
15. *Мотуз В.М.* О происхождении блюдцеобразных западин в лессовых породах БССР // Почвенные исследования и применение удобрений. 1978. Вып. 9. С. 9–13.
16. *Мотуз В.М.* Условия образования лессовых пород пригляциальной зоны плейстоцена (в пределах Белоруссии) // Инженерная геология. 1980. № 2. С. 14–25.
17. На улице Куйбышева в Бресте ведутся восстановительные работы, они продлятся до 6 августа. <https://news.21.by/other-news/2020/08/05/2095642.html?ysclid=19sl5arqrm335561330>.
18. На улице Ленина в Витебске после урагана провалилась земля. <http://news.tut.by/accidents/233977.html?crnd=286>.
19. *Нечипоренко Л.А.* Современные геологические процессы в бассейне Верхнего Днепра (на территории Беларуси) // Природопользование. 2011. Вып. 20. С. 41–47.
20. *Павлов А.П.* О рельефе равнин и его изменениях под влиянием работы подземных и поверхностных вод // Землеведение. 1898. Т. 5. Кн. 3–4. С. 91–147.
21. *Павловский А.И.* Закономерности проявления эрозионных процессов на территории Беларуси. Минск: Навука і тэхніка, 1994. 102 с.
22. Оршанский район Витебской области. <https://yandex.by/maps/geo/1494224590/?l=sat&ll=30.566134%2C54.372130&z=14>.
23. *Пендин В.В., Гусельцев А.С., Фоменко И.К., Зеркаль О.В., Сироткина О.Н.* Оценка суффозионной опасности площадки АЭС и ее окрестностей. Опасные для строительства геологические процессы // Сб. матер. Междунар. сем., посвящ. 70-летию д.г.-м.н. В.П. Хоменко. М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2019. С. 22–29.
24. *Хоменко В.П.* Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.

THE ROLE OF SUFFUSION IN THE FORMATION OF ENGINEERING GEOLOGICAL CONDITIONS IN THE TERRITORY OF BELARUS

I. A. Krasovskaya^a, A. N. Galkin^{a,#}, A. I. Pavlovsky^{b,##}, and S. V. Andrushko^b

^a*Masherov Vitebsk State University,
Moskovskii pr. 33, Vitebsk, 210038 Belarus*

^b*F. Skorina Gomel State University,
Sovetskaya ul., 104, Gomel, 246028 Belarus*

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

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

The article presents the results of a comprehensive study of the conditions for the development and spread of natural and technogenic suffusion by the Belarus territory. It is noted that in insignificantly disturbed natural geoenvironment, the most favorable conditions for the development of suffusion have developed within the moraine and water-glacial plains and lowlands of the eastern part of the country, as well as marginal ice ridges and uplands with a cover of loess and loess-like formations with increased silt content, relatively low density of the soil skeleton, easy soakability and thixotropy, which contribute to the intensive development of the suffusion process. Active natural factors, conditions for the development and spread of suffusion, as well as forms of its manifestation in loess and loess-like soil massifs are considered. Suffusion manifestation in technogenically disturbed geoenvironment is analyzed, and its negative impact on functioning of natural-anthropogenic systems of various organization levels is shown by specific examples. In the authors' opinion, the creation of a monitoring system for the development of suffusion, as well as other exogenous geological and engineering geological processes, will provide up-to-date information on the distribution and manifestation activity of these processes and the factors that determine them.

Keywords: *suffusion, insignificantly disturbed natural conditions, loess and loess-like soils, active natural development factors, technogenically disturbed conditions, landforms*

REFERENCES

- [Be careful. The pit near the Festivalny park, into which a girl fell a few days ago, was fenced off]. <https://imag.one/news/budte-vnimateelnee-yamu-u-parka-festivalnogo-1/2673069> (in Russian)
- Galkin, A.N. [Engineering geology of Belarus. Part 1. Soils of Belarus]. Korolev, V.A., Ed., Vitebsk, VSU Publ., 2016, 367 p. (in Russian)
- Galkin, A.N., Matveev, A.V., Zhoglo, V.G. [Engineering geology of Belarus. The main features of the spatial variability of engineering-geological conditions and the history of their formation]. Vitebsk, VSU Publ., 2006, 208 p. (in Russian)
- Galkin, A.N., Matveev, A.V., Pavlovsky, A.I., San'ko, A.F. [Engineering geology of Belarus. Part 2. Engineering geodynamics of Belarus]. Korolev, V.A., Ed., Vitebsk, VSU Publ., 2017, 452 p. (in Russian)
- [The girl fell into the ground in the center of Vitebsk]. <https://news.tut.by/accidents/288712.html> (in Russian)
- [Due to the "geyser", the sidewalk at the Ice Palace collapsed]. <https://gomelnews.onliner.by/2013/08/17/proval?ysclid=lislte88kq938164566> (in Russian)
- Kolpashnikov, G.A. [Engineering geology]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2005, 132 p. (in Russian)
- Korsakova, O.P. [Geomorphological role of suffusion in loess rocks of Belarus]. Extended abstract Cand. Sci. (Geogr.) dissertation, Moscow, MSU Publ., 1990, 23 p. (in Russian)
- Lukashov, K.I., Stetsko U.U. [Geographical features of loess soil distribution in the Belarus territory]. *Vestsi AN BSSR. Ser. Fiz.-tekhn. nauk*, 1958, no. 4, p. 94–105. (in Belorussian)
- Kukharik, E.A. [Features of manifestation of modern karst and suffusion processes in the territory of Central Belarus]. *Litasfera*, 2022, no. 2 (57), pp. 94–100. (in Russian)
- Lomtadze, V.D. [Engineering geology. Engineering geodynamics]. Leningrad, Nedra Publ., 1977, 479 p. (in Russian)
- Matveev, A.V., Nechiporenko, L.A. [Peculiarities of manifestation and interaction of modern geological processes on the territory of Belarus]. *Vesnik Brestskaga universiteta. Seriya 5, Khimiya. Biyalogiya. Navuki ab Zyamli*, 2011, no. 1, pp. 91–99. (in Russian)
- Matveev, A.V., Nechiporenko, L.A. [Consequences of the manifestation of dangerous geological processes on the territory of Belarus]. *Prirodopol'zovaniye*, 2016, no. 29, pp. 30–37. (in Russian)
- Matveev, A.V., Nechiporenko, L.A., Pavlovsky, A.I. et al. [Modern dynamics of the relief in Belarus]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1991, 102 p. (in Russian)
- Motuz, V.M. [On the origin of saucer-shaped depressions in loess rocks of the BSSR]. *Pochvennyye issledovaniya i primeneniye udobrenii*, 1978, no. 9, pp. 9–13. (in Russian)
- Motuz, V.M. [Conditions for the formation of loess rocks in the periglacial zone of the Pleistocene (within Belarus)]. *Inzhenernaya geologiya*, 1980, no. 2, pp. 14–25. (in Russian)
- [Restoration work is underway on Kuibyshev Street in Brest, they will last until August 6]. <https://news.21.by/other-news/2020/08/05/2095642.html?ysclid=I9sl5arqrm335561330> (in Russian)
- [The earth collapsed on Lenin Street in Vitebsk after the hurricane]. <http://news.tut.by/accidents/233977.html?crnd=286> (in Russian)
- Nechiporenko, L.A. [Modern geological processes in the Upper Dnieper basin (on the territory of Belarus)]. *Prirodopol'zovaniye*, 2011, no. 20, pp. 41–47. (in Russian)
- Pavlov, A.P. [On the relief of the plains and its changes under the influence of the work of underground and surface waters]. *Zemlevedeniye*, 1898, vol. 5, book 3–4, pp. 91–147. (in Russian)
- Pavlovsky, A.I. [Patterns of manifestation of erosion processes in the territory of Belarus]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 102 p. (in Russian)
- [Orsha district of the Vitebsk region]. <https://yandex.by/maps/geo/1494224590/?l=sat&ll=30.566134%2C54.372130&z=14> (in Russian)
- Pendin, V.V., Gusel'tsev, A.S., Fomenko, I.K., Zerkal, O.V., Sirotkina, O.N. [Assessment of suffusion hazard at a NPP site and its vicinity. Geological processes hazardous to construction]. Proc. Intern. Workshop dedicated to the 70th birthday of Dr. V.P. Khomenko. Moscow, MISI-MGSU Publ., 2019, pp. 22–29. (in Russian)
- Khomenko, V.P. [Regularities and forecasting of suffusion]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian)

УДК 551.435:551.343

О ПРИЧИНАХ ЗАТУХАНИЯ ТЕРМОСУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА БЕСТЯХСКОЙ ТЕРРАСЕ р. ЛЕНЫ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

© 2023 г. Л. А. Гагарин^{1,*}, В. В. Оленченко^{2,**}, Н. А. Павлова¹¹ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
ул. Мерзлотная, 36, Якутск, 677010 Россия²ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

*E-mail: gagarinla@gmail.com

**E-mail: olenchenkovv@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.05.2023 г.

После доработки 16.05.2023 г.

Принята к публикации 19.05.2023 г.

В статье приведены результаты исследований термосуффозионных процессов в области разгрузки межмерзлотных вод в долине руч. Улахан-Тарын в Центральной Якутии. С помощью геофизических исследований методом электротомографии и термометрии, а также анализа ландшафтных условий территории установлены факторы, способствующие затуханию термосуффозии в песчаных отложениях IV (бестяхской) надпойменной террасы р. Лена. В ходе исследований прослежены сукцессионные стадии восстановления растительности в зонах аккумуляции песчаного материала, вынесенного подземным потоком. Смена сукцессионных рядов сопровождается изменением геокриологических условий в области разгрузки подземных вод, вплоть до полного ее промерзания. Изучена современная мерзлотно-гидрогеологическая обстановка в местах прекращения разгрузки подземных вод, и предложена концепция ее изменения при нарушении устойчивости многолетнемерзлых пород, перекрывающих водоносный горизонт. Благоприятные условия для промерзания водовыводящей зоны создаются после формирования подземной полости и обрушения ее мерзлой кровли. Перекрытие путей подземного стока способствует восстановлению мерзлоты внутри массива горных пород и изолированию зоны выноса пород, разрушенных термосуффозией. Таким образом, совокупность внутренних (затруднение водообмена) и внешних (сукцессия растительных сообществ) факторов является причиной затухания термосуффозионных процессов на бестяхской террасе р. Лена.

Ключевые слова: термосуффозия, межмерзлотные воды, надмерзлотные воды, талик, многолетнемерзлые породы, сукцессия, электротомография

DOI: 10.31857/S0869780923040045, EDN: GZMBSP

ВВЕДЕНИЕ

В области криолитозоны на площадях распространения песчаных отложений один из опасных процессов, повышающий риск снижения устойчивости инженерных сооружений, – термосуффозия. Разные авторы называли этот процесс зимней напорной механической суффозией [16], суффозией [21]. В зарубежной литературе Т. Czudek, J. Demek, [24], С. Embleton, J. Thornes, [25] под термосуффозией (thermo-suffosion) предлагается рассматривать последнюю стадию термокарстового процесса, связанную с вымыванием мелких частиц грунта водами, образованными в результате таяния подземного льда. В представленной статье под этим термином понимается оттаивание дисперсных многолетнемерзлых горных пород (ММП) под воздействием тепла фильтрующихся подземных вод, последу-

ющее гидромеханическое разрушение породного массива и вынос из него материала [6]. Наиболее активно термосуффозионные процессы, сопровождающиеся деструктивными образованиями (провалами, воронками, оползнями) происходят в криолитозоне в области разгрузки подземных вод. Известны случаи развития этого процесса на Забайкальской железной дороге [16] в пределах массива эоловых Чарских песков в Забайкалье. Авторы данной работы наблюдали термосуффозионные провалы в населенных пунктах г. Якутск и пос. Нижний Бестях. В обоих случаях они были связаны с оттаиванием грунтов вокруг подземных водонесущих коммуникаций и выносом частиц грунта при утечке воды. В Центральной Якутии изучение динамики термосуффозионных процессов проводилось вблизи зоны групповой разгрузки межмерзлотных вод в урочище руч. Улахан-

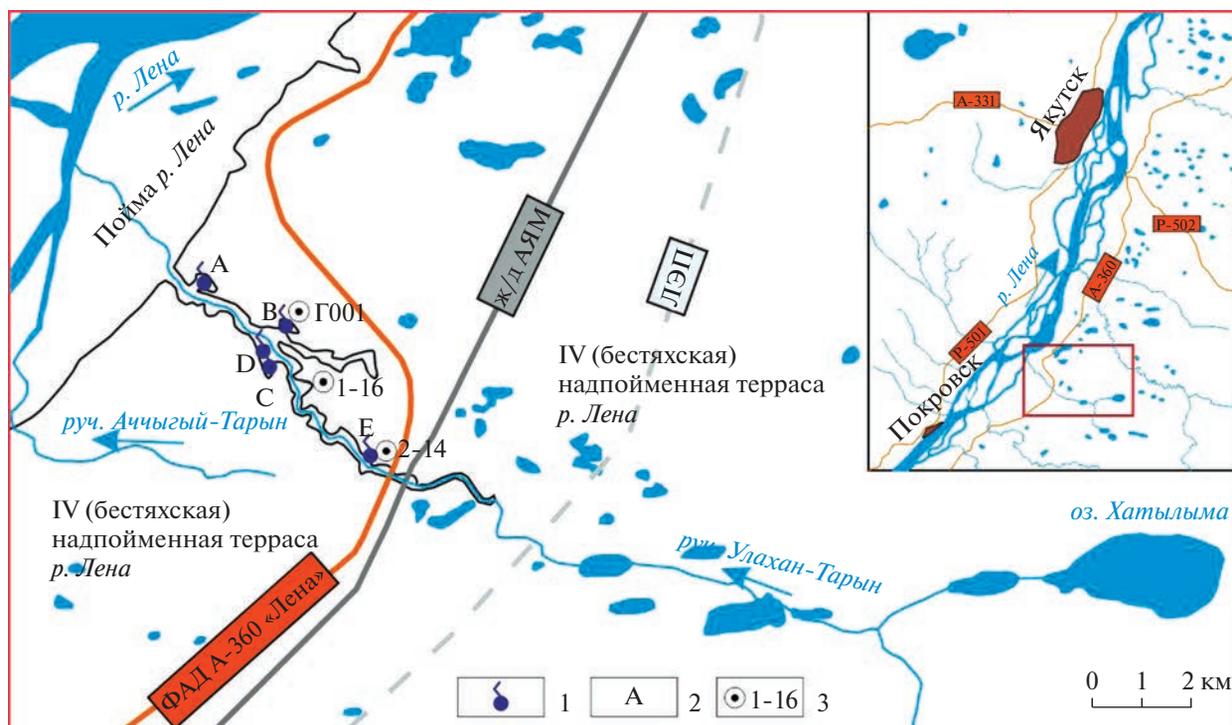


Рис. 1. Схема расположения исследуемого участка: 1 – родник межмерзлотных вод; 2 – название термосуффозионного цирка, к которому приурочены родники; 3 – скважина и ее номер.

Тарын [5, 6, 13, 21]. Существенная активизация провалобразования на этом участке началась в 2009 г. и была спровоцирована увеличением обводненности таликов в предыдущие три года. По данным геодезических исследований за 4 года объем термосуффозионных понижений здесь составил более 260 тыс. м³ [6].

Цель настоящего исследования – детализация механизма затухания термосуффозионного процесса и оценка влияния природных факторов на его режим.

ХАРАКТЕРИСТИКА УЧАСТКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Участок исследований расположен на правобережье р. Лена (рис. 1) в пределах IV (бестяхской) надпойменной террасы [7, 9]. Рельеф террасы пологоволнистый с заросшими формами эоловой аккумуляции, вытянутыми водно-эрозийными понижениями, занятыми озерами глубиной 2–4 м. Склон террасы крутой, высотой до 15–30 м.

В литологическом строении участка принимают участие четвертичные пески, преимущественно однородные мелкой фракции, с гравийно-галечниковым слоем в основании. В верхней части разреза до глубины 2–7 м пески косослоистые, в нижней части – горизонтально- и волнистослои-

стые, переслаивающиеся с тонкозернистым песком и алевритом [15]. Песчаную толщу подстилают среднекембрийские выветрелые известняки [9, 10].

Геокриологические условия в пределах бестяхской террасы р. Лена сложные. Мощность ММП изменяется от 200 до 420 м [9, 13, 14]. Их температура в основании слоя годовых теплооборотов на выровненных участках в сосновом редколесье составляет -0.2°C , в межрядовых понижениях и речных долинах понижается до -2.5°C [3]. В толще рыхлых четвертичных отложений широко распространены водоносные субаэральные надмерзлотные и межмерзлотные талики, нередко гидравлически связанные с водами подозерных таликов. Дренаживание надмерзлотно-межмерзлотного водоносного горизонта осуществляется в долинах рек и ручьев, прорезающих бестяхскую террасу. Участки выходов подземных вод на поверхность зимой фиксируются наледями. В зоне разгрузки подземных вод из-за высокого значения градиента напора ($I = 1.1$) активизируются термосуффозионные процессы [6]. Вынос песчаного материала, слагающего матрикс водоносного горизонта и его оттаявшей мерзлой кровли, осуществляется в пределах долины водотока, к которой приурочен родник (рис. 2а). На поверхности террасы образуются провальные формы рельефа (воронки, поноры, блоковые просадки поверхности и др.), а в ее уступе – циркообразные понижения (рис. 2б). Наиболее высокодебитная



Рис. 2. Песчаный конус выноса в цирке Е (а) и обзорный вид цирков (б) в долине руч. Улахан-Тарын (фото Л.А. Гагарина).

группа родников, где ярко проявлена термосуффозия, приурочена к нижнему течению руч. Улахан-Тарын – правого притока р. Лена (см. рис. 1). В долине этого ручья в настоящее время действует 5 групповых выходов подземных вод (А, В, С, Д и Е) с суммарным дебитом, изменяющимся в зависимости от водности лет от 176 до 550 л/с. Изобилие в долине руч. Улахан-Тарын циркообразных форм рельефа, заросших березняками и лиственничниками, свидетельствует о существовании в недалеком прошлом и других мест разгрузки подземных вод.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выявления областей некогда существовавших зон разгрузки межмерзлотных подземных вод в долине руч. Улахан-Тарын были проведены дешифрирование космоснимков и маршрутные описания местности на выделенных участках. Описание типов ландшафтов выполнено на основе классификации, разработанной [19] до уровня урочищ. В основу классификационной схемы приняты следующие элементы ландшафта: тип растительности, тип рельефа, литологический состав горных пород, глубина сезонного протаивания горных пород, средняя годовая температура горных пород на подошве деятельного слоя [2].

Маршрутное обследование долины руч. Улахан-Тарын в области существующей и ранее предполагаемой разгрузки подземных вод проведено в сентябре 2015 г. Ландшафтные исследования местности включали описание растительности и особенностей рельефа. Для изучения литологического состава горных пород в пределах деятельного слоя на типичных ландшафтах заданы шурфы глубиной до 3.5 м, измерена мощность слоя сезонного оттаивания пород. Данные о средней годовой температуре горных пород заимствованы из литературных источников [3] и частично

получены авторским коллективом в ходе многолетних геотермических наблюдений. Измерения выполнялись с помощью 4-канальных логгеров НОВО U12-008, датчики которых установлены на глубинах 0; 0.5; 1.2; 3.5; 8 и 14 м. Частота измерений – каждые 3 ч.

Для оценки мерзлотно-гидрогеологических условий территории выполнены электроразведочные работы методом электротомографии по двум профилям в мае 2016 г. При зондированиях использовалась аппаратура “Скала-64”, разработанная в ИНГГ СО РАН. Длина установки зондирования составляла 315 м с шагом между электродами 5 м. Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной установке Шлюмберже и дипольно-осевой установке. Глубинность зондирований составила 70 м. На профиле 2 (см. рис. 4) применялась дипольно-осевая установка зондирования, что дало возможность изучить разрез до глубины 110 м.

Дешифрирование космоснимков

Термосуффозионные процессы проявляются вблизи области разгрузки межмерзлотных вод, приуроченной к нижнему течению руч. Улахан-Тарын (рис. 3). В присклоновой части бестяхской террасы в настоящее время имеются пять сконцентрированных групп родников межмерзлотных подземных вод [6, 8]. Также напротив группы Е расположен источник, именуемый “Наледный” [1]. На поверхности террасы и ее склоне возникают и активно развиваются суффозионные воронки и провалы, увеличивающиеся из года в год размеры оврагов (цирков).

Кроме формирующихся цирков в присклоновой части бестяхской террасы расположено огромное количество балок. Особенно их много на отрезке протяженностью около 2.5 км между группами родников В и Е как на правом, так и на



Рис. 3. Фрагмент космоснимка долины руч. Улахан-Тарын по данным Яндекс Карты: 1 – развивающиеся овраги (термоцирки) и название группы источников подземных вод; 2 – балки.

левом бортах долины Улахан-Тарына. Балки представляют собой врезы в склон террасы шириной от первых десятков метров до 235 м, длиной до 270 м, полого наклонные. Некоторые из них имеют циркообразные очертания, наподобие мест разгрузки действующих источников (цирки А, В, С и D). На космических снимках балки, покрытые густой древесной и кустарниковой растительностью, выделяются более яркими тонами, по сравнению с сероватыми оттенками соснового редколесья поверхности бестяхской террасы и коричневыми и светло-коричневыми цветами безлесных участков конусов выноса, поймы руч. Улахан-Тарын и зон разгрузки подземных вод. От некоторых балок вглубь террасы прослеживаются понижения в рельефе, как правило, линейно вытянутые. Они, как и балки, маркируются яркими зелеными оттенками древесной и кустарниковой растительности.

Описание ландшафтов

В ходе маршрутных исследований было выполнено описание ландшафтов в 17 точках (табл. 1). Выбор точек обусловлен стремлением охвата наибольшего разнообразия типов урочищ и выявления различных стадий сукцессии растительности на участках, подвергшихся термосуффо-

зии. Поверхность исследуемой территории слабо расчлененная, обращенная в сторону р. Лена. Согласно классификации ландшафтов [19], эта территория относится к песчано-грядовому типу местности. В его пределах распространены преимущественно редкостойные лишайниково-толокнянковые сосняки, березово-лиственничники, луговые и заболоченные западины. Последние три типа растительных ассоциаций приурочены к пониженным участкам рельефа.

Долина руч. Улахан-Тарын относится к мелкодолинному типу местности. В пределах этого таксона выделены преимущественно ельники зеленомошные, тальники березовые разнотравные, осоковые луга, незакрепленные конусы выноса.

Склоновый тип местности приурочен к склону бестяхской террасы, обнажающемуся в долине руч. Улахан-Тарын. Высота эрозионного вреза на участке от федеральной дороги к устью ручья увеличивается от 16 до 30 м. Поверхность склона террасы над выходами подземных вод, как правило, представлена оголенными песками.

Геофизические исследования

В конце мая 2016 г. для изучения геолого-геокриологических условий в районе точек 14 и 16



Рис. 4. Схема расположения геофизических профилей в долине руч. Улахан-Тарын.

(см. табл. 1) были выполнены исследования методом электротомографии по двум профилям (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Профиль 1 длиной 315 м располагался в изголовье балки и протягивался перпендикулярно ее простирацию. Профиль 2 длиной 475 м был размечен вдоль тальвега балки и достигал поймы руч. Улахан-Тарын. Для интерпретации поля кажущихся электрических сопротивлений в качестве эталона использован разрез скважины 1–16 (рис. 5), которую пересекал профиль 1. Скважина 1–16 глубиной 25 м пробурена в апреле 2016 г. Под слоем многолетнемерзлых мелко- и среднезернистых песков мощностью 16 м были вскрыты обводненные породы (пльвун) до забоя скважины. В разрезе песков с глубины 9 м отмечены прослой супеси толщиной 1–2 мм, а с глубины 13 м – до 0.5 м.

Согласно [5, 13], пороговое значение удельного электрического сопротивления (УЭС), разделяющее мерзлые и талые пески бестяхской терра-

сы р. Лена, соответствует 1000 Ом м. Соответственно более высокие его величины отражают мерзлое состояние пород, ниже – талое. Области пониженного (200–600 Ом м) и низкого (35–150 Ом м) УЭС интерпретируются как талые пески с разной степенью влажности и количеством супесчаных прослоев.

Распределение УЭС на рис. 5 отражает как литологический состав пород, так и геокриологические условия участка. Присутствие в песке прослоев супеси с глубины 9 м уменьшает УЭС с 3500–5500 до 2000 Ом м. С глубины 16 м, где вскрыты водонасыщенные пески, значение УЭС пород понижается с высоким градиентом с 1400 до 70–120 Ом м.

Разрез УЭС пород по профилю 1 отражает мерзлотно-гидрогеологическое строение в пределах балки, в которой прекращена разгрузка подземных вод (рис. 6). По распределению УЭС хорошо заметно, что нижняя граница ММП имеет сложную конфигурацию. В основании балки (ин-

Таблица 1. Описание ландшафтов в долине руч. Улахан-Тарын

№ точки	Координаты		Описание ландшафта
	Северная широта	Восточная долгота	
1	61°33'02.1"	129°35'30.4"	Песчаная гряда. Вырубка, произрастают сосняк и толокнянково-лишайниковые
2	61°33'17.4"	129°34'46.9"	Межгрядовое понижение. Березово-елово-лиственничник разнотравно-арктоусовый зеленомошный
3	61°33'17.1"	129°35'48.8"	Локальное понижение, болото. Кочкарник арктоусово-осоковый зеленомошный. Гл. СТС 1.20 м*
4	61°33'10.0"	129°35'47.7"	Пойма руч. Улахан-Тарын. Произрастает елово-березовый ивняк осоковый зеленомошный, редкий кочкарник. Гл. СТС 0.84–1.20 м
5	61°33'13.5"	129°35'37.2"	Пойма руч. Улахан-Тарын. Произрастает ельник осоково-ивовый зеленомошный. Гл. СТС 1.30–1.40 м
6	61°34'18.2"	129°33'52.8"	Пойма руч. Улахан-Тарын, старый конус выноса напротив цирка В. Произрастает елово-березняк разнотравный зеленомошный. Гл. СТС 2.00 м
7	61°34'13.7"	129°33'47.0"	Пойма руч. Улахан-Тарын, напротив цирка С. Произрастает ерничник осоковый зеленомошный, кочкарник. Гл. СТС 1.10–1.34 м
8	61°33'07.0"	129°35'51.1"	Пойма руч. Улахан-Тарын, песчаный конус выноса напротив цирка Е. Произрастает редкий ивняк осоковый (высотой до 0.5 м). Гл. СТС >2.46 м. Подземные воды вскрыты с 0.96 м. В русле ручья, вытекающего из цирка Е гл. СТС сокращается до 0.80–1.25 м
9	61°33'26.2"	129°36'17.0"	Заболоченное понижение, покрытое кочкарником. Произрастают арктоусо-осоковые луга зеленомошные. Гл. СТС 0.45–0.60 м
10	61°33'25.6"	129°36'16.8"	Склон озерной котловины. Произрастает сосново-березово-лиственничник багульниково-брусничниковый зеленомошный. Гл. СТС 1.30 м. С 0.55 м вскрыт водоносный слой
11	61°33'13.4"	129°35'54.6"	Балка. Произрастает березово-сосново-лиственничник багульниково-голубичный зеленомошный. Гл. СТС 1.30 м
12	61°33'14.4"	129°35'52.6"	Балка, шириной 30 м. Произрастает лиственнично-ельник осоково-голубичниковый зеленомошный с фрагментами кочкарника. Гл. СТС 0.50 м
13	61°33'45.2"	129° 5'13.3"	Песчаная гряда близ склона руч. Улахан-Тарын. Отмечены следы пожаров. Сосняк толокнянковый
14	61°33'52.1"	129°34'30.7"	Балка. Произрастает березово-елово-лиственничник арктоусово-голубичный зеленомошный. Гл. СТС 0.55 м
15	61°33'22.9"	129°35'25.5"	Балка шириной 10–15 м. Произрастает березово-лиственничник толокнянковый. Гл. СТС 1.65 м
16	61°33'53.0"	129°34'45.1"	Песчаная гряда. Сосняки толокнянково-лишайниковые. Гл. СТС 3.55 м
17	61°33'23.0"	129°35'39.0"	Межгрядовое понижение. Сосново-березово-елово-лиственничник разнотравный лишайниковый зеленомошный. Гл. СТС 0.80–1.00 м

* Гл. СТС – глубина сезонноталого слоя

тервал профиля 120–180 м) мощность мерзлой толщи составляет 20 м. Мощность же межмерзлотного водоносного талика оценивается в 65–70 м.

С глубины 95 м в разрезе проявляются породы с высокоомным сопротивлением, интерпретируемые как породы коренного цоколя [5, 13]. Потен-

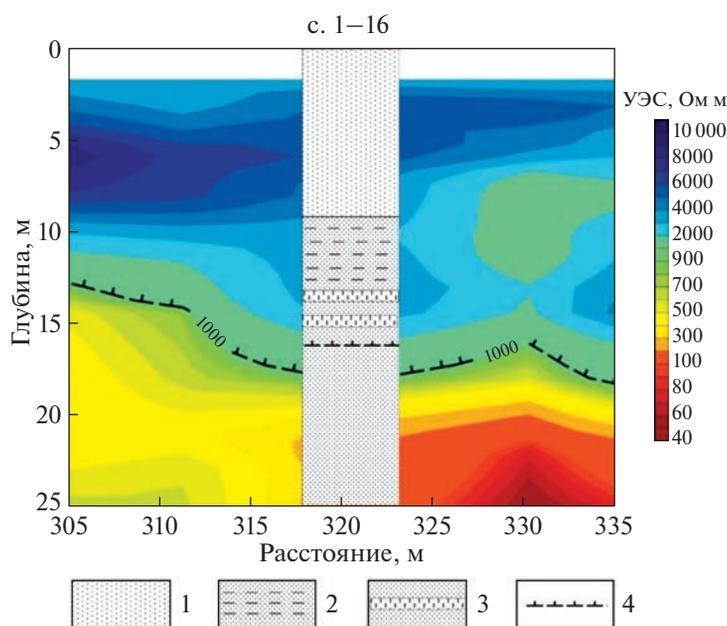


Рис. 5. Геоэлектрический разрез и геологический разрез по скважине 1–16: 1 – песок; 2 – песок с прослоями супеси мощностью 1–2 мм; 3 – песок с прослоями супеси мощностью до 0,5 м; 4 – подошва ММП.

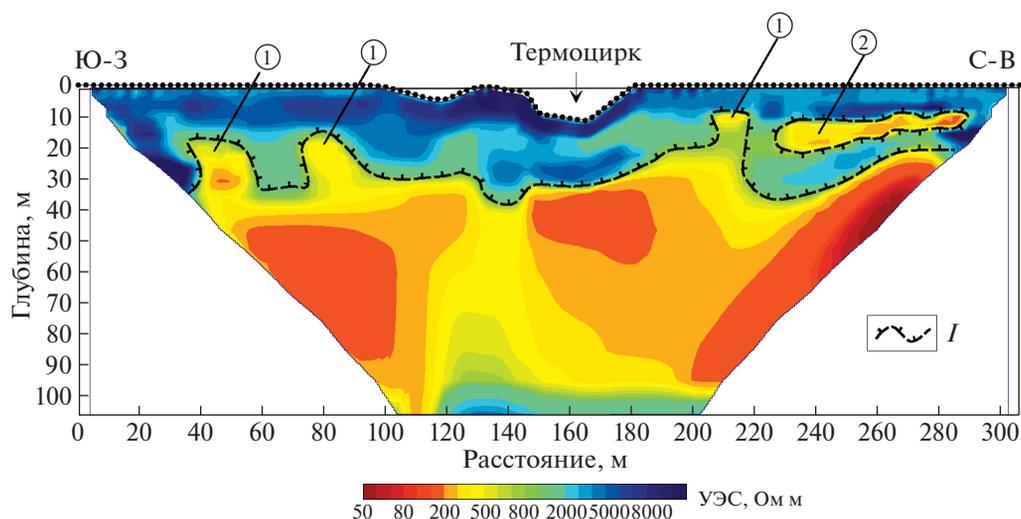


Рис. 6. Геоэлектрический разрез по профилю 1. 1 – потенциальные участки образования термосульфозионных воронок; 2 – внутримерзлотный талик. I – подошва мерзлых пород.

циальные участки развития термосульфозионных воронок на профиле 1 отмечены по характерным аномалиям УЭС в интервалах профиля 35–55, 75–90 и 210–220 м, в пределах которых мощность мерзлой толщи над межмерзлотным таликом сокращается до 8–16 м. В интервале профиля 230–300 м на глубине 10–20 м аномалия пониженного УЭС нами интерпретируется как внутримерзлотный талик сложной конфигурации.

Строение мерзлотно-гидрогеологического разреза *вдоль* тальвега балки отражено на геоэлектрическом разрезе по профилю 2 (рис. 7).

На разрезе по границе пород низкого (менее 600 Ом·м) и высокого УЭС интерпретируется современная граница ММП, располагающаяся на глубине в среднем 20 м. Стоит отметить, что пойменная часть разреза (значения УЭС >3500 Ом м) заморожена на всю глубину зондирования (до 80 м), а межмерзлотный водоносный талик прак-

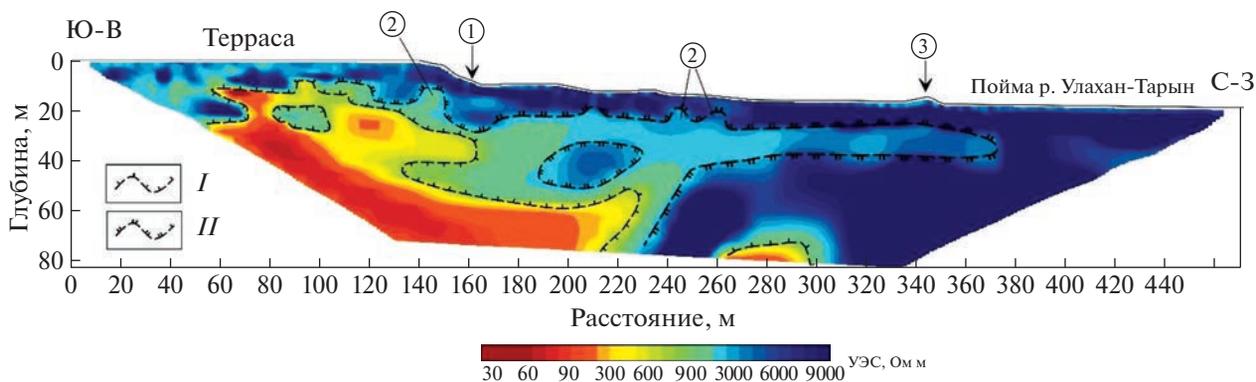


Рис. 7. Геоэлектрический разрез по профилю 2. 1 – термоцирк; 2 – предполагаемая замороженная зона разгрузки подземных вод; 3 – останец. *I* – современная подошва ММП по данным электротомографии; *II* – предполагаемая граница многолетней мерзлоты в период активной разгрузки подземных вод.

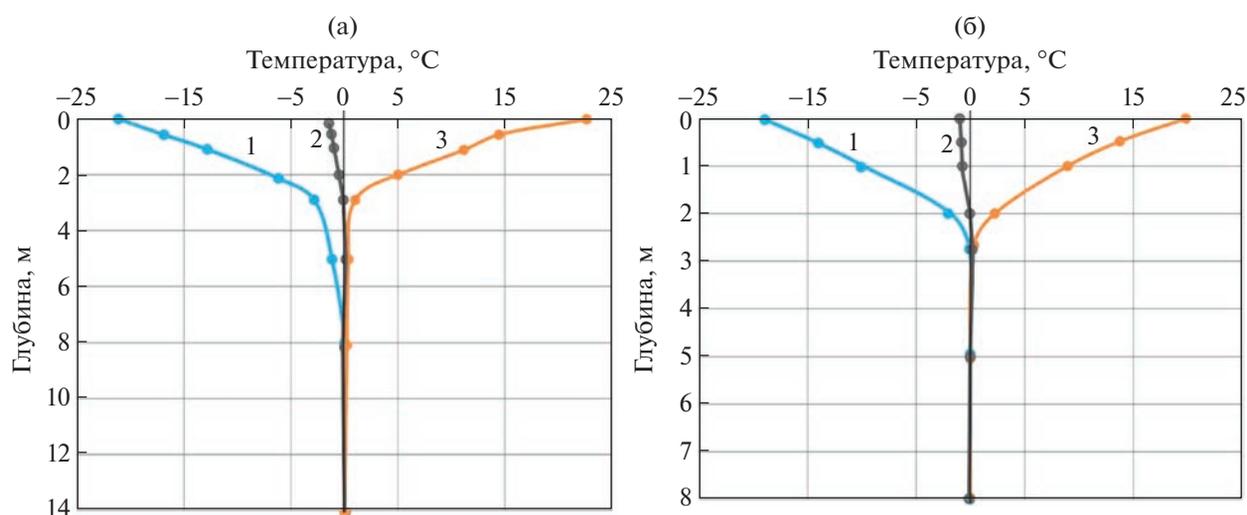


Рис. 8. Огибающие температурные кривые по данным скважины 2–10 за 2010–2013 гг. (а) и за 2014–2020 гг. (б), расположенной в районе цирка Е источника Улахан-Тарын. Температура: 1 – минимальная, 2 – средняя, 3 – максимальная.

тически субвертикально (интервалы профиля 210–230 м на рис. 7) выклинивается в направлении к пойме р. Улахан-Тарын. Однако распределение УЭС свидетельствует, что в период существования разгрузки подземных вод на месте исследуемой балки конфигурация границы мерзлых пород была иной. Так, в интервале профиля 140–150 м на глубине 7–10 м по аномалии пониженного УЭС (до 1800 на фоне 4500 Ом м) выделяется характерная область, интерпретируемая как водовыводящая зона. Узкая вытянутая область пониженного УЭС внутри мерзлой толщи прослеживается почти до современной поймы р. Улахан-Тарын. Мы считаем, что таким образом выделяется замороженный в настоящее время канал фильтрации, по которому происходил транзит подземных вод к зонам разгрузки в недалеком прошлом.

В районе участка разгрузки подземных вод в цирке Е (см. рис. 3), обнаруженного в 2009 г., с этого же года на песчано-грядовом типе местности ведутся непрерывные термометрические наблюдения в слое годовых теплооборотов (12 м). По данным скважины 2–10 (см. рис. 1) глубина сезонного протаивания горных пород составляет в среднем 3.5 м, а температура на подошве нулевых годовых амплитуд равна -0.2°C (рис. 8). В 2014 г. по результатам замеров температуры удалось зафиксировать начало формирования субэврального надмерзлотного талика [4]. С 2014 по 2020 г. глубина залегания верхней границы ММП сместилась с 3.5 до 6.0 м (см. рис. 8). Основной причиной формирования талика, по нашему мнению, явились аномально большое количество и интенсивный режим выпадения жидких атмосферных осадков в начале лета [4]. В резуль-

тате этого были значительно повышены влагозапасы в деятельном слое, что привело к сохранению зимой водоносного “буферного слоя”, препятствовавшего промерзанию горных пород.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Внешние факторы, способствующие затуханию термосуффозии

В результате многолетних исследований источника подземных вод Улахан-Тарын установлено, что область питания подземных вод межмерзлотного водоносного горизонта (ММВГ) приурочена частично к аласному и межаласному типам местности и преимущественно к песчано-грядовому. В первых двух типах местности гидравлическая связь поверхностных вод с ММВГ осуществляется через сеть водопоглощающих подоцерных таликов [1, 2, 8, 21, 22].

В песчано-грядовом типе местности инфильтрационное питание ММВГ происходит как через субаквальные (подоцерные), так и субаэральные надмерзлотные талики. Здесь же расположена и область транзита подземных вод. В ее пределах межмерзлотный водоносный талик неоднократно был вскрыт разведочными скважинами на глубинах 24–36 м под толщей ММП. Мощность талика не выдержана и изменяется от 8 до 25 и более м. Наличие перекрывающего и подстилающего криогенного водоупора определяет напорный режим фильтрации межмерзлотных вод, уровень которых устанавливается в скважинах на 24–34 м выше кровли водоносного горизонта. Вблизи зоны разгрузки подземных вод глубина залегания ММВГ составляет 16–27 м, мощность его увеличивается до 32–56 м, а напор межмерзлотных вод не превышает 7–12 м.

Зимой практически сухие пески сезонноталого слоя (весовая влажность не более 5%) в песчано-грядовом типе местности обеспечивают низкую теплопроводность мерзлых горных пород, а в теплый период года быстрая инфильтрация талых снеговых вод и атмосферных осадков, сопровождающаяся увеличением теплопроводности песков, способствует глубокому их протаиванию — до 4–5 м [2, 20]. ММВГ — по существу крупный источник тепла, также вносит значительный вклад в формирование температурного режима пород. Об этом свидетельствуют высокие значения среднегодовой температуры ММП (до -0.2°C), перекрывающих ММВГ, и сокращение мощности слоя годовых теплооборотов вплоть до совпадения его с мощностью слоя сезонного протаивания пород [17].

Область дренажа ММВГ приурочена к мелкодолинному типу местности. Разгрузка подземных вод происходит в циркообразных понижениях (оврагах), врезанных в борт бестяхской террасы,

осложняющих строение долины руч. Улахан-Тарын. В летний период — это нисходящие и восходящие струи и пластовые выходы подземных вод, зимой — восходящие родники, как правило, скрытые наледью. Разгрузка подземных вод сопровождается выносом песка, который откладывается в долине руч. Улахан-Тарын.

Наличие в долине руч. Улахан-Тарын многочисленных оврагов и балок, врезанных в бестяхскую террасу р. Лена (см. рис. 4), а также молодых и относительно древних конусов выноса свидетельствует о стадийности процесса термосуффозии. Периоды его активации следуют за периодами избыточного увлажнения территории, когда на протяжении ряда лет наблюдается сочетание превышения суммы летних атмосферных осадков и влагозапаса в снежном покрове относительно средних многолетних значений [6, 11]. Такие гидроклиматические события, сопровождающиеся повышением уровня воды в озерах, увеличением водообильности таликов и ростом гидравлических градиентов фильтрационного подземного потока, выступают в роли “пускового механизма” для термосуффозионных процессов.

Термосуффозионное разуплотнение горных пород, приводящее к обрушению кровли ММВГ и формированию провалов на дневной поверхности, значительно трансформирует облик рельефа. Появление и увеличение со временем диаметра и глубины термосуффозионных воронок, их объединение, приводят к развитию оврагов, в пределах которых температурно-влажностный режим горных пород значительно отличается от сопредельной территории. Об этом свидетельствуют описанные нами ландшафты на ключевых участках, прямо и косвенно указывающие на изменение мерзлотно-гидрогеологической обстановки.

Образование трещин в песчаном массиве, разрушение растительного покрова, появление локальных депрессий поверхности земли способствуют повышению средней годовой температуры горных пород. К примеру, по данным скважины 2–10, расположенной вдали от суффозионных воронок в пределах песчано-грядового типа местности, глубина СТС достигает 3.5 м, а годовых теплооборотов — 12 м, при средней годовой температуре на подошве последнего -0.2°C . По результатам термометрии в скважине 1–09, расположенной в таком же типе местности, но в 3–5 м от активного оврага в цирке Е, увеличивающегося за счет объединения суффозионных воронок, глубина СТС совпадает с глубиной годовых теплооборотов и соответствует 3.5 м при средней годовой температуре пород на подошве этих слоев $\sim 0^{\circ}\text{C}$.

Изменения рельефа приводят к перераспределению влаги в деятельном слое, а также условиям теплообмена горных пород с атмосферой.

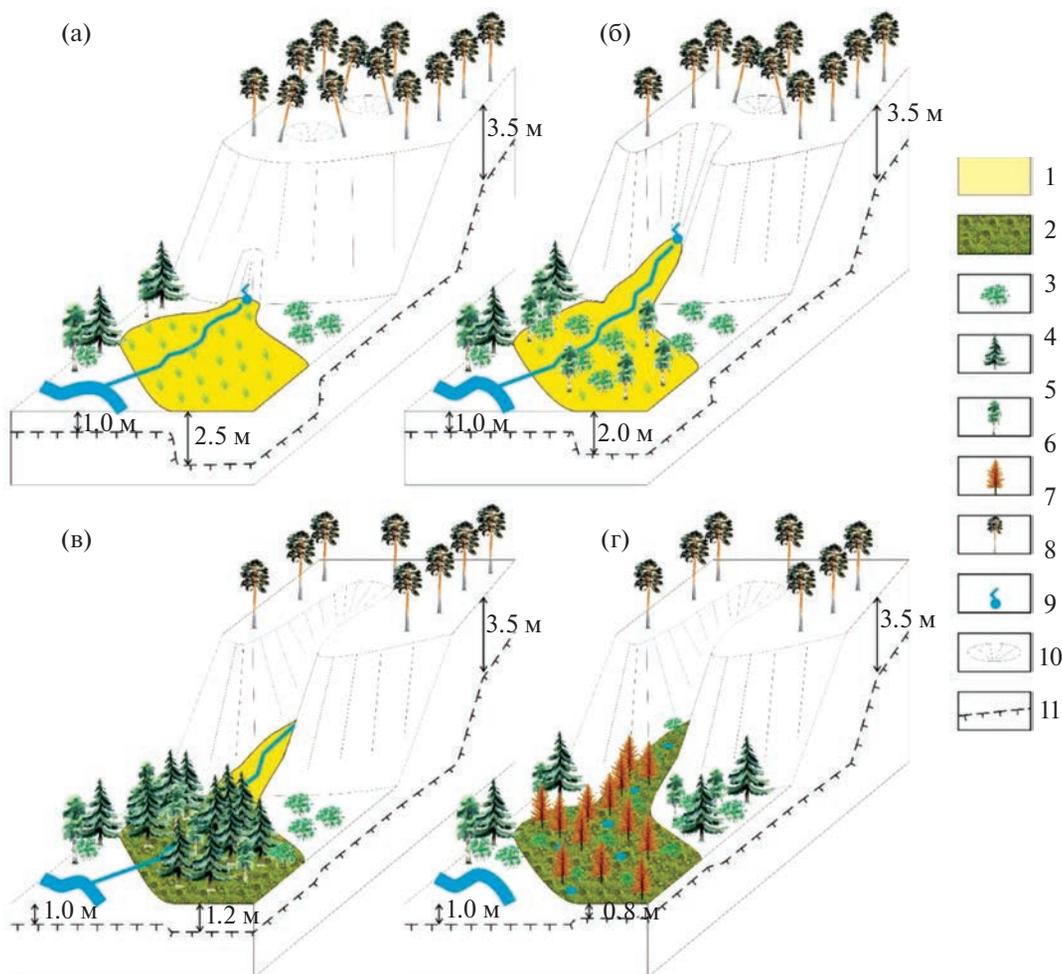


Рис. 9. Схема сукцессий растительности на участках развития термосульфидационных процессов в районе руч. Улахан-Тарын. 1 – песчаный конус выноса; 2 – моховой покров; 3 – луговая растительность; 4 – кустарники; 5 – береза; 6 – ель; 7 – лиственница; 8 – сосна; 9 – источник подземных вод; 10 – термосульфидационная воронка; 11 – граница ММП.

В первую очередь на эти изменения ландшафта реагирует состав растительных сообществ. Сукцессионные ряды растительности являются объективными показателями трансформации геокриологических условий. Результаты мерзлотно-ландшафтных исследований, полученные на нарушенных площадях в Центральной Якутии рассмотрены в работах [12, 18, 23]. Например, на вырубках и пирогенных территориях на начальной стадии восстановления растительности оголенная поверхность горных пород постепенно зарастает травянистой, травянисто-кустарниковой растительностью. Затем на увлажненных почвах появляются береза, тальник. Длительность первых двух стадий составляет около 20 лет. Березово-тальниковая группировка зрелого возраста вытесняется елью и лиственницей. На этой стадии развития образуется моховой теплоизолирующий покров, способствующий уменьшению мощности деятельного слоя и понижению температуры горных пород на его подошве. На завершающей фазе (50 лет) сукцессии рас-

тительность представлена лиственничником с тальниковым подлеском.

Закономерность восстановления мерзлотных ландшафтов мы попытались проследить в долине руч. Улахан-Тарын, и тем самым оценить внешние факторы затухания термосульфидационных процессов. После появления очага разгрузки межмерзлотных подземных вод у подножия склона бестяхской террасы р. Лена в долине ручья начинаются активный сульфидационный вынос песчаных частиц из водовмещающей толщи и аккумуляция их в виде конуса выноса (рис. 9а).

Подобное явление наблюдалось авторами при обнаружении родника в цирке Е в 2009 г. Молодые песчаные конусы выноса лишены растительности. После прекращения осадконакопления в течение нескольких лет на них появляется луговая растительность. Глубина СТС на таких участках достигает 2.5 м. На смежных участках поймы руч. Улахан-Тарын деятельный слой не превышает 1 м.



Рис. 10. Общий вид пещеры, обнаруженной в цирке Е источника Улахан-Тарын, (а) и лед в ее стенке (б), 20.09.2011 г. (фото Л.А. Гагарина).

Появление растительного покрова на конусах выноса и в приустьевой части развивающегося оврага изменяет теплообмен между атмосферой и горными породами, как правило, в сторону охлаждения последних. Как результат, сокращается мощность деятельного слоя. Поверхность таких участков начинает покрываться влаголюбивой растительностью: разнотравьем, ивовыми и березовыми кустарниками, а мощность СТС сокращается до 2.0 м (рис. 9б). В строении более древних конусов выноса, помимо песков, участвуют и продукты их выветривания — алевриты. Такие объекты покрыты елово-ивово-березовыми осоковыми ассоциациями растений. Глубина СТС в пределах древних конусов выноса сокращается до 0.8–2.0 м (рис. 9б). На устье старых балок растут березово-ельники зеленомошные. Мощность СТС здесь 1.2–1.5 м (рис. 9в). На последней стадии сукцессионного ряда березняки и ельники замещаются лиственничниками зеленомошными с кочкарником. Подобные растительные ассоциации характерны для днища долины руч. Улахан-Тарын (мелкодолинный тип местности). Глубина СТС здесь составляет 0.5–0.8 м (рис. 9г).

Таким образом, изменения ландшафтных и мерзлотно-гидрогеологических условий в долине руч. Улахан-Тарын затрудняют условия разгрузки подземных вод вплоть до полного промерзания водовыводящей зоны и являются одной из причин затухания термосуффозионных процессов на bestяхской террасе р. Лены.

Внутренние факторы, способствующие затуханию термосуффозии

В результате разуплотнения горных пород при термосуффозионных процессах в склоне bestяхской террасы р. Лена образуются полости (пеще-

ры) глубиной в несколько метров при ширине свода до 5 м [5, 6, 13]. Очаги разгрузки подземных вод могут смещаться от дневной поверхности у подножия склона террасы вглубь упомянутых пещер [1, 13]. Подобные явления авторы неоднократно наблюдали в полостях, расположенных в склонах цирков В и Е. Родник в пещере также, как и на других участках разгрузки подземных вод в долине руч. Улахан-Тарын, представлял собой грифон (псевдовулкан), из которого водным потоком выносились песчаные частицы. Ручей, питаемый этим родником, растекался по всей площади пещеры и вытекал из нее (рис. 10). Днище пещер было сложено мерзлым песком, оттаявшим сверху на глубину первых сантиметров при взаимодействии с водой. Боковые стенки и кровля полостей находились в мерзлом состоянии. По форме пустоты напоминали трубы [9, 22]. В цирке Е в одной из таких пещер в задней ее стенке было обнаружено ледяное тело (см. рис. 10) [6]. По его периметру присутствовали отдельные включения льда в виде корок, на общем фоне массивной криогенной текстуры. Появление в стенках пещер монолитных ледяных включений и корковой криогенной текстуры в мерзлом песчаном массиве можно объяснить следующим образом. При расширении полостей до критических размеров, когда свод не выдерживает вышележащей нагрузки, происходит обрушение мерзлой кровли ММВГ. При провалообразовании нарушаются гидродинамические условия (направление и скорость потока, его напор). Заполнивший полость мерзлый песчаный массив выступает в качестве барража, препятствующего стоку родниковых вод. Во время обрушения свода в нем образуются серпообразной формы локальные пустоты и трещины, которые под напором межмерзлотных вод заполняются и замерзают [6, 14].

Ухудшение условий разгрузки приводит к локализации каналов стока и уменьшению расхода ручья на выходе из пещеры. Подобные процессы, особенно в холодные и малоснежные зимы, способствуют перемерзанию зоны разгрузки подземных вод и, как следствие, изолированию области выноса песчаного материала и затуханию термосуффозии. Усугубляет подобный ход событий образование наледи над родником и в днище цирка. Она выступает в роли дополнительного барьера, препятствующего поверхностному стоку. Стоит отметить, что это лишь предположения возможных причин затухания процесса термосуффозии.

В качестве косвенного доказательства того, что затухание термосуффозии связано с изменчивостью гидродинамических и геотермических условий в ММВГ и его кровле служат интерпретируемые мерзлотно-гидрогеологические разрезы, построенные на основе геоэлектрических полей и заверенные данными буровых работ. Глубина залегания кровли ММВГ в районе старой балки не выдержана по разрезу и изменяется от 10 до 30 м (см. рис. 5). Это свидетельствует об изменчивости мерзлотно-гидрогеологических условий в относительно недавнем прошлом [6, 14]. Выделенные на разрезе участки с наиболее тонким слоем ММП (см. рис. 6) характеризуют зоны потенциального развития термосуффозии и разуплотнения горных пород [5, 13]. Локализованная аналогичная область на участке профиля 230–300 м, вероятно, свидетельствует о современном перемерзании ранее сконцентрированных зон подземного стока. По геоэлектрическому разрезу, заданному вдоль оси балки (см. рис. 7), также напрашивается вывод о современном перемерзании некогда существовавших областей подповерхностного стока. По аналогии с этапностью развития термосуффозии [6], по мере выноса межмерзлотными подземными водами песчаных частиц, сопровождающегося образованием и развитием провальных форм рельефа, область разгрузки смещается в изголовье оврага. Об этом свидетельствует зона постепенно уменьшающихся значений УЭС на профиле 2 (см. рис. 7) на пикетах от 370 до 160 м на глубине от 20 до 30 м. Мы предполагаем, что на этом участке в настоящее время происходит промерзание ранее существовавшего межмерзлотного водоносного талика.

На увеличение суровости мерзлотных условий, по сравнению с окружающей территорией, указывают и ландшафтные признаки (лиственничник зеленомошный с кочкарником). Предполагается, что в период существования родника в этом месте, когда шло развитие термоцирка (оврага), межмерзлотный водоносный талик распространялся в направлении поймы до пикета 240–370 м профиля (см. рис. 7). Дополнительным подтверждением этому является песчаный холм-останец на дне балки, расположенный в несколь-

ких десятках метров от поймы руч. Улахан-Тарын (высота до 2 м, диаметр ~ 10 м). На вершине холма и его склонах произрастают сосновые деревья высотой до 12 м. Это косвенно свидетельствует о более глубоком сезонном его протаивании в отличие от окружающей территории, где произрастают редкие лиственницы, а поверхность сплошь покрыта кочкарником. Подобного рода останцы встречаются в зонах современной разгрузки подземных вод в цирках. По генезису они являются оползнями, которые формируются на склоне бессточной террасы р. Лена из-за суффозии и разуплотнения горных пород.

Таким образом, прекращение разгрузки подземных вод в результате обрушения кровли ММВГ в термоцирке приводит к затруднению фильтрации подземных вод, уменьшению дебита родника и способствует промерзанию водовыводящей зоны пород в тальвеге оврага. Изолирование области выноса песчаного материала мерзлыми породами приводит к затуханию термосуффозии. При этом не исключается образование новых выходов подземных вод на удалении от промерзшей зоны.

ВЫВОДЫ

Разуплотнение горных пород в результате термосуффозии значительно изменяет рельеф земной поверхности и, как следствие, трансформирует облик ландшафта. Образование трещин в песчаном массиве, нарушение растительного покрова, появление локальных депрессий поверхности способствуют увеличению глубины сезонного протаивания, повышению среднегодовой температуры горных пород, увеличению запаса влаги в деятельном слое. Значительная часть соснового редколесья, из-за просадок рельефа, погибает. Увеличение диаметра и глубины термосуффозии приводит к развитию оврага, в пределах которого температурно-влажностный режим горных пород существенно отличается от сопредельной территории. Разгрузка подземных вод с постоянной температурой, в течение года близкой к 0°C, на дне оврага создает избыточное увлажнение и низкую амплитуду колебаний температуры горных пород деятельного слоя. В ходе эволюции оврага, при прекращении осадкоаккумуляции, начинается сукцессия растительности. Оголенная поверхность горных пород сначала зарастает травянистой, травянисто-кустарниковой растительностью. Постепенно на увлажненных почвах появляются березняки, ивняки. При достижении березово-таежной группировки зрелого возраста она вытесняется ельником и лиственничником. На этой стадии развития ландшафта образуется моховой покров, способствующий уменьшению мощности деятельного слоя и понижению температуры горных пород на

его подошве. Завершающая фаза сукцессии характеризуется увеличением количества листовничного леса с тальниковым подлеском. В целом такое развитие ландшафта сопровождается постепенным изменением геокриологической обстановки вплоть до аградации мерзлоты в водовыводящей зоне.

Тем не менее лишь внешнего фактора может быть недостаточно для промерзания области разгрузки подземных вод. Примером тому служат современные крупные группы источников в термосуффузионных цирках. Благоприятные условия для промерзания водовыводящей зоны создаются после формирования подземной полости и обрушения ее мерзлой кровли. Перекрытие путей подземного стока способствует восстановлению мерзлоты внутри массива горных пород и изолированию зоны выноса пород, разрушенных термосуффузией [13]. В свою очередь, совокупность внутренних (затруднение водообмена) и внешних (сукцессии растительных сообществ) факторов является причиной затухания термосуффузионных процессов на бестяхской террасе р. Лены.

Полевые геотермические, геофизические и ландшафтные исследования выполнены в рамках базового проекта НИОКТР №122012400106-7. Дешифрирование аэрофотоснимков, изучение сукцессий и комплексный анализ результатов полевых исследований выполнены при поддержке гранта РНФ и Якутского научного фонда № 22-17-20040. Интерпретация геофизических данных выполнена при поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований FWZZ- 2022-0024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимова Н.П.* Формирование химического состава подземных вод таликов (на примере Центральной Якутии). М.: Наука, 1971. 196 с.
2. *Бойцов А.В.* Геокриология и подземные воды криолитозоны. Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. 178 с.
3. *Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н.* Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии. Якутск: ИМ СО РАН, 2002. 218 с.
4. *Гагарин Л.А.* Оценка современных условий формирования субэаральных таликов в Центральной Якутии // Матер. Всерос. сов. по подземным водам Востока России. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2015. С. 76–80.
5. *Гагарин Л.А., Бажин К.П., Оленченко В.В., Огонеров В.В., Ву Цинбай.* Выявление участков потенциального термосуффузионного разуплотнения грунтов вдоль федеральной автодороги А-360 “Лена” в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2019. № 3 (23). С. 61–68.
6. *Гагарин Л.А., Семерня А.А., Лебедева Л.С.* Оценка термосуффузионных процессов в Центральной Якутии на примере участка Улахан-Тарын // Геоэкология. 2016. № 3. С. 252–262.
7. *Галанин А.А., Павлова М.Р., Шапошников Г.И., Лыткин В.М.* Тукуланы: песчаные пустыни Якутии // Природа. 2016. № 11. С. 44–55.
8. *Ефимов А.И.* Незамерзающий пресный источник Улахан-Тарын в Центральной Якутии // Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике. 1952. № 3. С. 60–105.
9. *Иванов М.С.* Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. Новосибирск: Наука, 1984. 126 с.
10. *Камалетдинов В.А.* Рельеф цоколя и строение четвертичного покрова Лено-Амгинского междуречья // Геология Кайнозоя Якутии. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1982. С. 94–103.
11. *Колесников А.Б.* Влияние современных параметров климата на условия инфильтрационного питания водоносных таликов Центральной Якутии // Матер. Всерос. сов. по подземным водам Востока России. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2015. С. 114–117.
12. *Лыткина Л.П., Миронова С.И.* Послепожарная сукцессия в лесах криолитозоны (на примере Центральной Якутии) // Экология. 2009. № 3. С. 168–173.
13. *Оленченко В.В., Гагарин Л.А., Христофоров И.И., Колесников А.Б., Ефремов В.С.* Строение участка развития термосуффузионных процессов в пределах Бестяхской террасы реки Лены по геофизическим данным // Криосфера Земли. 2017. № 5 (21). С. 16–26.
14. *Павлова Н.А., Колесников А.Б., Ефремов В.С., Шепелев В.В.* Химический состав подземных вод межмерзлотных таликов в Центральной Якутии // Водные ресурсы. 2016. № 2 (43). С. 216–227.
15. *Правкин С.А., Большианов Д.Ю., Поморцев О.А., Савельева Л.А. и др.* Рельеф, строение и возраст четвертичных отложений долины р. Лены в Якутской излучине // Вестник СПбГУ. 2018. № 2 (63). С. 209–229.
16. *Румянцев Е.А.* Наледный процесс и явление зимней напорной суффузии // Тр. Хабаровского ин-та инженеров ж/д транспорта. 1966. (21). С. 4–15.
17. *Семерня А.А., Гагарин Л.А., Бажин К.И.* Гидрогеологические особенности участка распространения межмерзлотного водоносного комплекса в районе источника Ерюю (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2018. № 2 (XXII). С. 29–38.
18. *Тимофеев П.А., Исаев А.П., Шербаков И.П.* Леса среднетаежной подзоны Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1994. 140 с.
19. *Федоров А.Н.* Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования. Якутск: ИМЗ СО РАН, 1991. 140 с.
20. *Шендер Н.И., Бойцов А.В., Тетельбаум А.С.* Формирование таликов и высокотемпературных мерзлых пород в условиях центральной Якутии // Матер. первой конференции геокриологов России. М.: Изд-во МГУ, 1996. Кн. 1. Ч. 3. С. 525–537.
21. *Шепелев В.В.* Оценка эрозионно-суффузионной деятельности источников Центральной Якутии // Известия вузов: Геология и разведка. 1972. (9). С. 88–92.

22. Шенелев В.В., Бойцов А.В., Оберман Н.Г., Петченко М.Ф. и др. Мониторинг подземных вод криоли-тозоны. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2002. 172 с.
23. Шестакова А.А. Картографирование мерзлотных ландшафтов с учетом сукцессий растительности (на примере Лено-Алданского междуречья) // Сергеевские чтения. Роль инженерной геологии и изысканий на предпроектных этапах строитель-ного освоения территорий. М.: РУДН, 2012. С. 153–158.
24. Czudek T., Demek J. Thermokarst in Siberia and Its Influence on the Development of Lowland Relief // Quaternary Research. 1970. № 1 (1). С. 103–120.
25. Embleton C., Thornes J.B. Process in geomorphology. New York: Wiley, 1979. 436 с.

CAUSES OF THERMAL SUFFOSION ATTENUATION ON THE BESTYAKH TERRACE OF THE LENA RIVER, CENTRAL YAKUTIA

L. A. Gagarin^{a,#}, V. V. Olenchenko^{b,##}, and N. A. Pavlova^a

^aMelnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Merzlotnaya ul., 36, Yakutsk, 677010 Russia

^bTrofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, pr. akad. Koptuyuga 3, Novosibirsk, 630090 Russia

[#]E-mail: gagarinla@gmail.com

^{##}E-mail: olenchenkovv@yandex.ru

This paper presents the results of thermal suffosion study in the Ulakhan-Taryn Creek valley, Central Yakutia, where intrapermafrost groundwater is discharged. Interpretation of satellite images and analysis of field data from landscape surveys, electrical resistivity tomography studies and ground temperature observations were used to determine the factors contributing to the attenuation of thermal suffosion in sandy deposits of the IV (Bestyakh) terrace of the Lena River. Successional stages of revegetation in the accumulation zones of sands washed off by subsurface flow were examined. Vegetation succession was found to modify geocryological conditions in the groundwater discharge area, sometimes leading to its complete freezing. Conditions favorable both for permafrost aggradation and degradation may develop, depending on the landscape type. Ground temperature data indicate that the active layer thickness in sands at a thermal suffosion site covered by sparse pine forest is 3.5 m, while the mean annual permafrost temperature at the depth of zero annual amplitude is -0.2°C . In 2014, a subaerial talik began to form at this site, the bottom of which lowered from 3.5 m down to 6.0 m. At a larch site with tussocks, the active layer thickness is within 0.5–0.8 m and the mean annual permafrost temperature is about -2.0°C . An ERT survey provided information on the current permafrost and groundwater conditions, where groundwater discharge has ceased. A scenario is proposed describing the changes in the discharge area caused by permafrost disturbance above an aquifer. Formation of an underground cavity and collapse of the overlying permafrost layer resulting in characteristic depressions and sinkholes at the surface promote ground freezing in the discharge zone. Mechanical blocking the flow paths reduces the flow velocity promoting the restoration of permafrost and cutting off the area of soil removal by thermal suffosion. Further on, this attenuates the thermal suffosion. Its active phase can shift spatially due to thawing the pore ice in the permafrost in contact with the confined aquifer, widening soil voids and forming new flow pathways. Thus, attenuation of thermal suffosion on the Bestyakh Terrace of the Lena River results from the combination of internal (impeded flow) and external (vegetation succession) factors.

Keywords: thermal suffosion, intrapermafrost groundwater, suprapermafrost groundwater, talik, permafrost, succession, electrical resistivity tomography

REFERENCES

- Anisimova, N.P. Formation of groundwater chemistry in taliks: case study of Central Yakutia. Moscow, Nauka Publ., 1971, 196 p. (in Russian)
- Boitsov, A.V. Geocryology and underground water in permafrost. Tyumen, TyuGNGU Publ., 2011, 178 p. (in Russian)
- Varlamov, S.P., Skachkov, Yu.B., Skryabin, P.N. Temperature regime of permafrost landscapes in Central Yakutia. Yakutsk, IM SO RAN Publ., 2002, 218 p. (in Russian)
- Gagarin, L.A. Assessment of current settings of subaerial taliks in Central Yakutia. Proc. of the National conference on underground waters in Eastern Russia. Yakutsk, IM SO RAN Publ., 2015, pp. 76–80. (in Russian)
- Gagarin, L., Bazhin, K., Olenchenko, V., Ogonerov, V., Wu, Q. Revealing potential thermo-suffosional soil loosening sites along A-360 Lena Federal Highway, Central Yakutia. *Kriosfera Zemli*, 2019, no. 3 (23), pp. 61–68. (in Russian)
- Gagarin, L.A., Semernya, A.A., Lebedeva, L.S. The study of thermal suffosion processes in Central Yakutia: a case study of Ulakhan-Taryn site. *Geokologia*, 2016, no. 3, pp. 252–262. (in Russian)

7. Galanin, A.A., Pavlova, M.R., Shaposhnikov, G.I., Lytkin, V.M. [Tukulans: sandy deserts of Yakutia. *Priroda*, 2016, no. 11, pp. 44–55. (in Russian)
8. Efimov, A.I. Nonfreezing freshwater spring Ulakhan-Taryn in Central Yakutia. *Permafrost Studies in the Republic of Yakutia*, 1952, no. 3, pp. 60–105. (in Russian)
9. Ivanov, M.S. Cryogenic structure of Quaternary deposits in Lena–Aldan depression. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984, 126 p. (in Russian)
10. Kamaletdinov, V.A. Base relief and structure of the Quaternary cover in the Lena–Amga interfluvium. *Geology of the Cenozoic of Yakutia*. Yakutsk, YaF SO AN SSSR, 1982, pp. 94–103. (in Russian)
11. Kolesnikov, A.B. Influence of modern climate parameters on the conditions of infiltration feeding of aquifers in Central Yakutia. Proc. National conference on underground waters in Eastern Russia. Yakutsk, IM SO RAN Publ., 2015, pp. 114–117. (in Russian)
12. Lytkina, L.P., Mironova, S.I. Postfire succession in a forest of the cryolithozone: the example of Central Yakutia. *Ekologiya*, 2009, no. 3, pp. 168–173. (in Russian)
13. Olenchenko, V.V., Gagarin, L.A., Khristoforov, I.I., Kolesnikov, A.B., Efremov, V.S. The structure of a site with thermal suffosion processes within Bestyakh terrace of the Lena River, according to geophysical data. *Kriosfera Zemli*, 2017, no. 5 (21), pp. 16–26. (in Russian)
14. Pavlova, N.A., Kolesnikov, A.B., Efremov, V.S., and Shepelev, V.V. Groundwater chemistry in intrapermafrost taliks in Central Yakutia. *Vodnye resursy*, 2016, no. 2 (43), pp. 216–227. (in Russian)
15. Pravkin, S.A., Bolshiyarov, D.Yu., Pomortsev, O.A., Savelieva, L.A., et al. The relief, structure and age of Quaternary deposits in the Lena River valley, the Yakutian bend] *Vestnik SPbGU*, 2018, no. 2 (63), pp. 209–229. (in Russian)
16. Rumyantsev, E.A. Icing process and the phenomenon of winter pressure suffusion. *Trudy Khabarovskogo in-ta inzhenerov zh/d transporta*, 1966, v. 21, pp. 4–15. (in Russian)
17. Semernya, A.A., Gagarin, L.A., Bazhin, K.I. Cryohydrogeological features of the site of intrapermafrost aquifer distribution at the Eruu spring area (Central Yakutia). *Kriosfera Zemli*, 2018, no. 2 (22), pp. 29–38. (in Russian)
18. Timofeev, P.A., Isaev, A.P., Shcherbakov, I.P. Forests of the middle taiga subzone in Yakutia. Yakutsk, YaNTs SO RAN Publ., 1994, 140 p. (in Russian)
19. Fedorov, A.N. Permafrost landscapes in Yakutia: identification technique and mapping issues. Yakutsk. IM SO RAN Publ., 1991. 140 p. (in Russian)
20. Shender, N.I., Boitsov, A.V., Tetelbaum, A.S. Formation of taliks and high-temperature frozen soil in Central Yakutia. Proc. the first conference of Russian geocryologists. Moscow, MGU Publ., 1996, book 1, vol. 3, pp. 525–537. (in Russian)
21. Shepelev, V.V. Evaluation of the erosion-suffosion activity of springs in Central Yakutia. *Izvestiya vuzov: Geologiya i razvedka*, 1972, no. 9, pp. 88–92. (in Russian)
22. Shepelev, V.V., Boitsov, A.V., Oberman, N.G., Petchenko, M.F., Sannikova, A.V., et al. Monitoring of underground waters in the cryolithozone. Yakutsk, IM SO RAN Publ., 2002, 172 p. (in Russian)
23. Shestakova, A.A. Mapping of permafrost landscapes taking into account vegetation successions (on the example of the Leno-Aldan interfluvium). Sergeev Readings. The role of engineering geology and surveys at the pre-project stages of construction development of territories. Moscow, RUDN Publ., 2012, pp. 153–158. (in Russian)
24. Czudek, T., Demek, J. Thermokarst in Siberia and its influence on the development of lowland relief. *Quaternary Research*, 1970, no. 1 (1), pp. 103–120.
25. Embleton, C., Thornes, J.B. Process in geomorphology. New York, Wiley, 1979, 436 p.

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.4

ОЦЕНКА РЕАКЦИИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ НАВАЛА ЛЕДОВЫХ ПОЛЕЙ

© 2023 г. В. Н. Кутергин^{1,*}, А. Б. Манукин¹, Ф. С. Карпенко¹, К. В. Панков¹

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

*E-mail: vank@bk.ru

Поступила в редакцию 28.08.2023 г.

После доработки 19.10.2023 г.

Принята к публикации 19.10.2023 г.

Комплексная оценка возможной деградации грунтов при воздействии длительных циклических нагрузок от движения ледовых полей включала ряд этапов. Предварительно проведена процедура расчета ожидаемых параметров амплитудно-частотного спектра воздействий и соответствующих усилий сдвига. В ходе экспериментов, выполненных с рассчитанными параметрами и нагрузками, получены “кривые деградации прочности”, характеризующие изменение прочности дисперсных грунтов при циклических воздействиях. Факторы, определяющие снижение прочности: циклический характер нагружения, его амплитуда, продолжительность, а механизм — возможное перераспределение напряжений с минерального скелета на поровую воду. Выполнен итоговый анализ поведения грунтов с учетом циклического характера действия ледовых нагрузок в течение зимнего периода принятой продолжительности. Приведены результаты оценки устойчивости грунтового основания площадки на шельфе северной части Каспийского моря.

Ключевые слова: *грунты, ледовые поля, параметры воздействия, циклические нагрузки, прочность*

DOI: 10.31857/S0869780923050065, **EDN:** ICJBAF

ВВЕДЕНИЕ

Ледовый панцирь сезонно или круглогодично покрывает значительные территории водных пространств: рек, озер, морей. Состояние ледового поля, как всякой твердой формы вещества, предполагает существование некоей статичной, стабильной системы. Однако такие возмущения окружающей среды, как ветры, движения подледных водных масс, изменения температур, в целом комплекс гидрометеорологических условий, обуславливают возможность перемещения ледовых полей. Движущийся лед при встрече с препятствием генерирует значительные нагрузки, подчас разрушающие. Преградами в пределах водных акваторий зачастую являются конструкции инженерных сооружений: мосты, порты, причалы, волноломы и пр. При определенных климатических условиях в различных регионах они испытывают значительные давления перемещающихся льдов.

В последние годы проблемы воздействия ледовых полей на объекты инженерной инфраструктуры приобретают все более существенное значение в связи с проектированием и строительством гидротехнических сооружений для обустройства месторождений и добычи полезных ископаемых

на шельфе морей. Для прогноза их устойчивости, обеспечения инженерной и экологической безопасности важна оценка свойств грунтов оснований и их изменений под влиянием движения ледовых полей.

Основная цель выполненных исследований заключалась в определении возможности и оценке изменения механических свойств водонасыщенных дисперсных грунтов при циклических нагрузках, моделирующих воздействия ледовых полей.

Комплексный подход к оценке возможной деградации грунтов оснований при воздействии длительных циклических нагрузок от навала ледовых полей включал ряд необходимых процедур. Методология исследования:

- анализ гидрометеорологических условий и морфометрических характеристик льда;
- расчет ожидаемых параметров амплитудно-частотного спектра движения ледовых полей и соответствующих усилий сдвига;
- выполнение экспериментальных исследований изменения прочности при моделировании рассчитанных параметров и нагрузок;
- итоговый анализ и оценка поведения грунтов с учетом распределения ледовых нагрузок различной

Таблица 1. Геологическое строение площадки

Стратиграфический индекс		№ инженерно-геологического элемента (ИГЭ)	Глубина залегания подошвы от дна, м	Наименование грунтов согласно ГОСТ 25100-2020
IIIhv	IIIhv ₂ ²	2–1	2.0–2.9	Суглинки мягкопластичные
		2–2	2.0–4.35	Супеси текучие
	IIIhv ₂ ¹	4–2	7.9–8.5	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого
			10.8–11.9	
	IIIhv ₁	5	15.3–15.9 17.2–17.6	Глины и суглинки мягкопластичные, известковистые

Таблица 2. Характеристики физико-механических свойств грунтов

Номер ИГЭ	Наименование грунтов	Плотность, г/см ³	Влажность, %	Коэффициент пористости, д.е.	Пластичность, %			Модуль общей деформации, Ео, МПа	Прочность	
					W _L	W _P	I _P		С, кПа	φ, град.
2–1	Суглинки мягкопластичные	1.96	27.5	0.765	33.0	20.2	12.8	7.8	23	14
2–2	Супеси текучие	1.99	22.0	0.652	21.6	17.8	3.8	4.9	9	30
4–2	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого	1.95	26.6	0.734	27.6	23.2	4.4	20.8	12	30
5	Глины и суглинки мягкопластичные, известковистые	1.89	34.5	0.950	41.3	24.5	16.8	16.5	24	15

интенсивности во времени в течение действия принятой продолжительности процесса.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предложенная методология опробована на площадках обустройства нефтегазодобывающих сооружений Северного Каспия. В качестве объекта воздействия были рассмотрены гравитационные (опирающиеся на грунт) типовые проектируемые сооружения, в частности, блок-кондуктор (БК) для сбора продукции из куста промысловых скважин.

Упомянутый нами в [1] БК имеет площадь опирания на грунт ~380 м² ($D \approx 11.0$ м), с возможностью дополнительного закрепления опорной юбки на морском дне сваями с глубиной погружения до 50 м.

В качестве опорной площадки сооружения принят участок акватории, геологическое строение которого кратко характеризуется в табл. 1, а показатели состава и физико-механических свойств исследованных грунтов приведены в табл. 2.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОТ НАВАЛА ЛЕДОВЫХ ПОЛЕЙ

Для моделирования циклического нагружения образцов необходимо обосновать величину частоты f и силы F воздействия на опору сооружения при навале и разрушении ледовых полей.

Движущееся ледяное поле, встречающее преграду, в частности, в виде цилиндрической опоры БК, на уровне поверхности воды воздействует на нее силой, определяемой простым соотношением:

$$F = \sigma_{сж} D h_l,$$

где $\sigma_{сж}$ – прочность льда на сжатие, D – диаметр опоры, h_l – толщина льда.

Для грубой оценки временных характеристик приложенной к опоре нагрузки скорость деформации $\dot{\gamma}$ льда можно положить постоянной и в соответствии с [3] принять равным: $\dot{\gamma} \approx v/3D$, где v – скорость дрейфа льда. При этом механическое

напряжение линейно нарастает и достигает предельного (прочности льда на сжатие) через время

$$T \approx \sigma_{сж}/E\dot{\gamma} \approx \sigma_{сж} 3D/Ev,$$

где E – модуль Юнга для льда.

Затем напряжение спадает практически до нуля очень быстро за время $t \approx 3D/c$, где c – скорость звука для льда.

Таким образом, зависимость силы от времени характеризуется относительно медленным нарастанием за время T до предельного напряжения и возвращением к нулю за время t . Упругие и прочностные параметры для льда сильно зависят от многих факторов: солёности льда, однородности, температуры и др., поэтому величины T и t могут иметь достаточно большой разброс.

Для ширины преграды $D \approx 11.0$ м, средней скорости дрейфа льда $v = 0.5$ м/с, $E = 8000$ МПа и прочности льда на сжатие $\sigma_{сж} = 1.67$ МПа, получим: $T \sim 0.0138$ с.

Время $t \approx 3D/c$ составит ~ 0.00868 (продольная скорость звука для льда $c \sim 3800$ м/с). Вычисления, приведенные выше, не учитывают отрезка времени между моментом разрушения и началом нового цикла накопления напряжений.

В соответствии с [2], под влиянием сосредоточенной силы, приложенной к точке прямолинейного края полубесконечной пластинки толщиной h и действующей в ее плоскости (аналог ледяного поля), в пластинке возникают напряжения. Вводя полярные координаты с углом α , отсчитываемым от направления действия приложенной силы, можно рассчитать искомое распределение напряжений:

$$\sigma_{rr} = -2F \cos \alpha / h\pi \cdot r, \sigma_{r\alpha} = \sigma_{\alpha\alpha} = 0.$$

Оно является чисто радиальным, т.е. на всякую перпендикулярную к радиусу площадку, действует только радиальная сжимающая сила. Линиями равных напряжений являются окружности $r = d \cos \alpha$, проходящие через начало координат и имеющие центры на прямой действия силы (рис. 1).

В случае воздействия ледяного поля, как только $\sigma_{rr} \geq \sigma_{сж}$, лед начинает ломаться, причем, поскольку напряжение обратно пропорционально r , разрушение происходит в непосредственной близости от кромки на глубину порядка толщины льда h_l .

Следующий цикл накопления напряжений начнется через время $t_1 \sim h_l/v$.

Используя данные о толщине и скорости движения льда (рис. 2), для расчета можно принять отмеченные в январе-феврале максимальные значения скорости $v \sim 90$ см/с при толщине льда $h_l \sim 60$ – 68 см. Таким образом, интервал времени

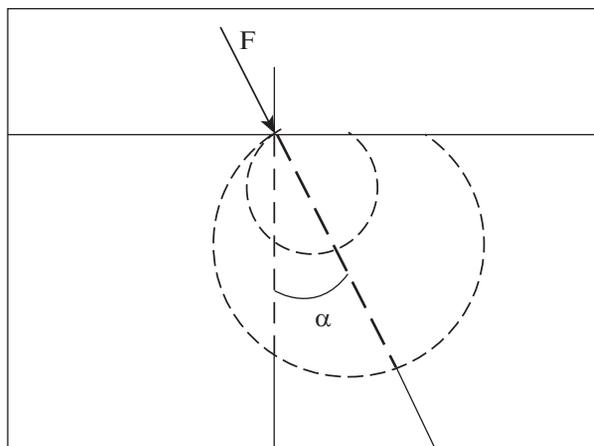


Рис. 1. Линии равных напряжений в полубесконечной пластине под действием силы F .

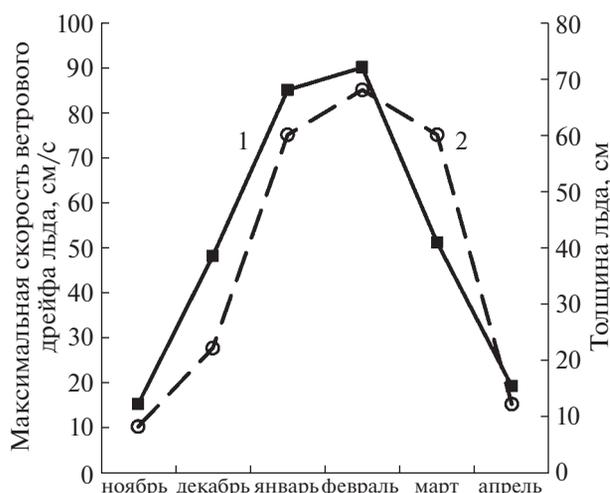


Рис. 2. Изменение максимальной скорости ветрового дрейфа льда (1) и толщины льда (2) по месяцам года.

нового накопления напряжений составит $t_1 \approx 0.66$ с.

При этом, как следует из графиков, рассчитываемый интервал t_1 может меняться в достаточно широких пределах от 0.44 до 4 с. Если воспользоваться значениями толщины льда ~ 60 см и средней скорости дрейфа ледовых полей ~ 50 см/с, то получим средний интервал $t_1 \sim 1.2$ с. Это значение можно принять для остальных месяцев зимнего периода, включая декабрь и март.

Схематично график зависимости действующей силы от времени навала ледяного поля на опору платформы имеет пилообразный вид (рис. 3). Основной характерный период воздействия равен $T_0 \approx T + t + t_1$, а основная частота $f \sim 1/T_0$.

В соответствии с приведенными оценками в январе-феврале преобладают более высокие ча-

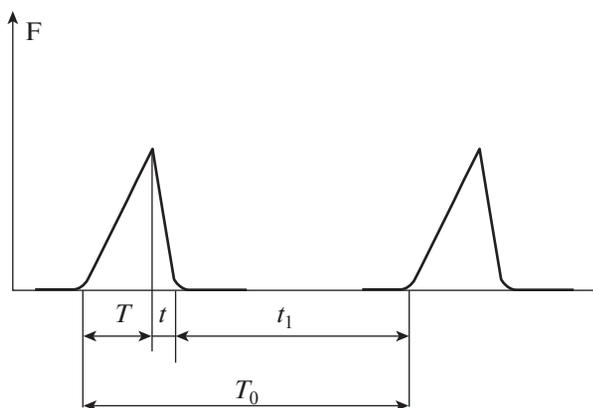


Рис. 3. Зависимость силы F от времени t воздействия ледяного поля на опору.

стоты $f \sim 1.5$ Гц, а в декабре и марте – более низкие $f \sim 0.8$ Гц.

Уточненную оценку силы, действующей на опору, можно дать, воспользовавшись известным по рекомендациям многих нормативных документов (в частности [3]) соотношением:

$$F = m\sigma_{сж} D h_l k_g,$$

где, в данном случае, m – коэффициент учета формы поперечного сечения преграды; k_g – коэффициент учета отличия распределения напряжений в ледяном поле от одномерного, значения которого зависят от D/h_l . Согласно учебным материалам кафедры “Океанотехника и морские технологии” СПбГМГТУ для цилиндрических преград, принимается значение $m = 1$, а k_g меняется в диапазоне от 1.0 при $D/h_l = 30$ до 2.5 при $D/h_l = 1$.

При расчете силы навала ледового поля для января-февраля принимались экстремальные значения толщины льда ~ 68 см (см. рис. 2), а для декабря и апреля ~ 22 см. Значения коэффициента k_g составили соответственно ~ 1.7 и ~ 1.0 .

Таким образом, максимальную амплитуду силы для января-февраля можно принять равной $F \approx \approx 21.2 \times 10^6$ Н, а декабря и апреля 4.0×10^6 Н.

Экзаменуя результаты, можно отметить, что наиболее близкие значения дают расчеты, выполненные по стандарту [5]. В соответствии с ним: $F = 8.1 \cdot \sqrt{Dh}$ (при $0.1 < Dh < 29.0$) составляет $\sim 22.15 \times 10^6$ Н.

По итогам расчетов, дрейф ледовых полей приводит к тому, что на опору платформы начинает действовать переменная сила F с максимальной амплитудой 21.2×10^6 Н и частотой ~ 1.5 Гц (в январе-феврале месяцах).

При этом оценка амплитуды напряжения сдвига грунта в основании платформы с площадью опирания 380 м^2 дает максимальное значение $A\tau_d \approx 0.055$ МПа и минимальное – 0.011 МПа.

Параметры напряженно-деформированного состояния, характеризующие условия проведения экспериментов, были приняты, исходя из сведений о массогабаритных характеристиках сооружения, а также данных об инженерно-геологических свойствах грунтов (табл. 3).

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Лабораторные экспериментальные работы выполнялись с использованием прибора циклического сдвига ПЦС-3 с программируемым управлением и автоматической регистрацией параметров эксперимента. На фоне действующих статических нагрузок, моделирующих природное напряженно-деформированное состояние грунтов, пульсаторами генерировались сдвигающие горизонтальные циклические нагрузки.

При моделировании принимались некоторые упрощения – пилообразный характер приложения нагрузок аппроксимировался периодическими гармоническими силовыми воздействиями заданной амплитуды, частоты и продолжительности.

Таблица 3. Параметры напряженно-деформированного состояния грунтов для проведения экспериментов

Номер ИГЭ	Принятая глубина залегания от дна, м	Характеристика грунтов	Напряжения по оси сооружения, $\sigma_{1эфф}$, МПа	Предельные статические напряжения сдвига, τ_s^* , МПа
2–1	2.0	Суглинки мягкопластичные	0.076	0.045
2–2	4.0	Супеси текучие	0.082	0.054
4–2	16.0	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого	0.187	0.125
5	17.5	Глины и суглинки мягкопластичные, известковистые	0.189	0.076

Для оценки изменения прочности грунтов при циклических нагрузках, моделирующих воздействие движения ледовых полей, выполнялись консолидировано-недренированные циклические сдвиговые испытания образцов. Методика испытаний аналогична подходу, используемому в методических разработках Норвежского геотехнического института (NGI) [6]. В сериях испытаний при различных соотношениях статических и динамических напряжений определяется число циклов нагружения (N), необходимое для разрушения грунта.

Предварительно в статических условиях для водонасыщенных образцов определялась так называемая “стандартная прочность” грунта (статическое предельное напряжение сдвига τ_s^*). При осевых уплотняющих нагрузках $\sigma_{1эфф}$, соответствующих условиям залегания грунта в массиве и нагрузкам от сооружения, образцы грунтов подвергались действию касательных сдвигающих нагрузок. Использовалась консолидировано-недренированная схема сдвиговых испытаний, при скорости нагружения, позволяющей достигнуть разрушения в течение двух часов [4]. Касательное напряжение, приложение которого вызывало резкий рост сдвиговых деформаций, принималось соответствующим предельному τ_s^* . Относительные деформации сдвига ϵ_s^* при достижении τ_s^* учитывались впоследствии в циклических опытах в качестве критерия разрушения.

Аналогичным процедурам водонасыщения и консолидации подвергались также образцы грунтов, испытанные в дальнейшем при постконсолидационном осевом давлении $\sigma_{1эфф}$ и циклических воздействиях. Циклические испытания выполнялись в недренированных условиях, путем приложения горизонтальных циклических нагрузок τ_{cy} заданной относительной амплитуды $A_{\tau_{cy}} = \tau_{cy}/\tau_s^*$. Достижение значений относительных деформаций сдвига ϵ_s^* считалось достаточным для преодоления прочности грунта, при этом фиксировались предельное циклическое напряжение τ_{cy}^* и соответствующее разрушению число циклов нагружения N^* .

В сериях испытаний для каждого ИГЭ идентичные образцы подвергались нагрузкам при иных уровнях нормализованных циклических напряжений τ_{cy}/τ_s^* , величину которых выбирали из расчета разрушения образца в пределах 10^4 циклов, т.е. двух часов нагружения при выбранных частотах 0.8–1.5 Гц.

В ходе опытов определялись осевые ϵ_1 и сдвиговые деформации ϵ_{cy} , контролировались напряжения $\sigma_{1эфф}$, τ_{cy} и относительное давление в поровой воде $\Delta U/\sigma_{1эфф}$.

Основными критериями преодоления прочности грунта считались:

- достижение амплитудных значений деформаций сдвига ϵ_{cy} , характерных для разрушения идентичного грунта при статических испытаниях ϵ_s^* ;
- рост отношения порового давления к эффективной осевой нагрузке $\Delta U/\sigma_{1эфф}$ до значений более 0.9 д.е.

Использованная методика испытаний аналогична изложенной в [1] методике консолидировано-недренированных циклических сдвиговых испытаний при нагрузках от штормовых волн, но для ледовых воздействий частота f принималась равной 0.8 и 1.5 Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе выполненных серий испытаний для грунтов каждого ИГЭ определено число циклов N^* , необходимое для разрушения при различных амплитудах приложенных циклических нагрузок τ_{cy} . Сопоставление τ_{cy} с уровнем предельных напряжений τ_s^* при статическом нагружении позволило охарактеризовать потерю прочности грунта при том или ином количестве циклов N^* или времени t^* циклического нагружения.

Изменение прочности наглядно выражается в виде “кривой деградации прочности” грунта, т.е. зависимости $\tau_{cy}/\tau_s^* = f(N)$. При обработке результатов продолжительность испытаний (число циклов нагружения N с той или иной частотой f) обычно представлялась в единицах времени: $t = N/f$.

В качестве примера на графике для грунтов ИГЭ 4–2 приведены значения τ_{cy}/τ_s^* , полученные при воздействиях с разной частотой (рис. 4).

Из анализа данных на рис. 4 следует, что при изменении периода нагружения от 1.25 до 0.66 с, значения времени до разрушения t^* оказываются близкими, т.е. частота приложения циклической нагрузки в диапазоне $f = 0.8–1.5$ Гц **существенно не влияет** на конечный результат.

Самым важным итогом циклического воздействия, как видно из графика, является снижение прочности грунтов по мере увеличения амплитуды знакопеременной нагрузки и числа циклов нагружения. Механизм этого процесса для супесей текучих, пластичных (ИГЭ 2–2, ИГЭ 4–2) и суглинков мягкопластичных (ИГЭ 2–1) рассмотрен на основе анализа исходных результатов экспериментов.

Характерные диаграммы результатов воздействия циклической нагрузки представлены на рис. 5.

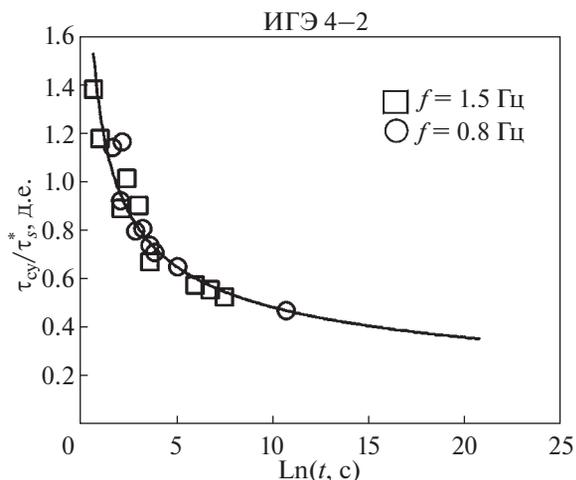


Рис. 4. Диаграмма соотношения времени циклического нагружения $\text{Ln}(t)$, необходимого для разрушения грунта, и величины нормированной прочности τ_{cy}/τ_s^* при $f = 0.8$ Гц и $f = 1.5$ Гц.

Отмечается накопление во времени осевых циклических деформаций ϵ_{cy} , а также избыточного порового давления ΔU , которое при дости-

жении значений $\Delta U/\sigma_{1эфф} > 0.95$ д.е., т.е. значений ΔU , близких к эффективному вертикальному давлению $\sigma_{1эфф}$, приводит к разрушению образцов грунта.

Таким образом, можно заключить, что для изученных грунтов циклический характер нагружения приводит к *снижению прочности за счет изменения напряженного состояния вследствие перераспределения нагрузок между минеральным скелетом и поровой жидкостью*.

Все результаты выполненных испытаний представлены на рис. 6 в виде диаграмм зависимости времени циклического нагружения t , необходимого для разрушения грунта, от величины нормированной прочности τ_{cy}/τ_s^* , т.е. уровня циклической нагрузки.

Согласно результатам исследований снижение прочности $\Delta\tau_s^*$ изученных грунтов при длительно действующих сдвигающих циклических нагрузках может достигать $\sim 55\text{--}60\%$ от стандартной статической прочности на сдвиг τ_s^* .

На графике отмечено время, соответствующее продолжительности движения ледовых полей в

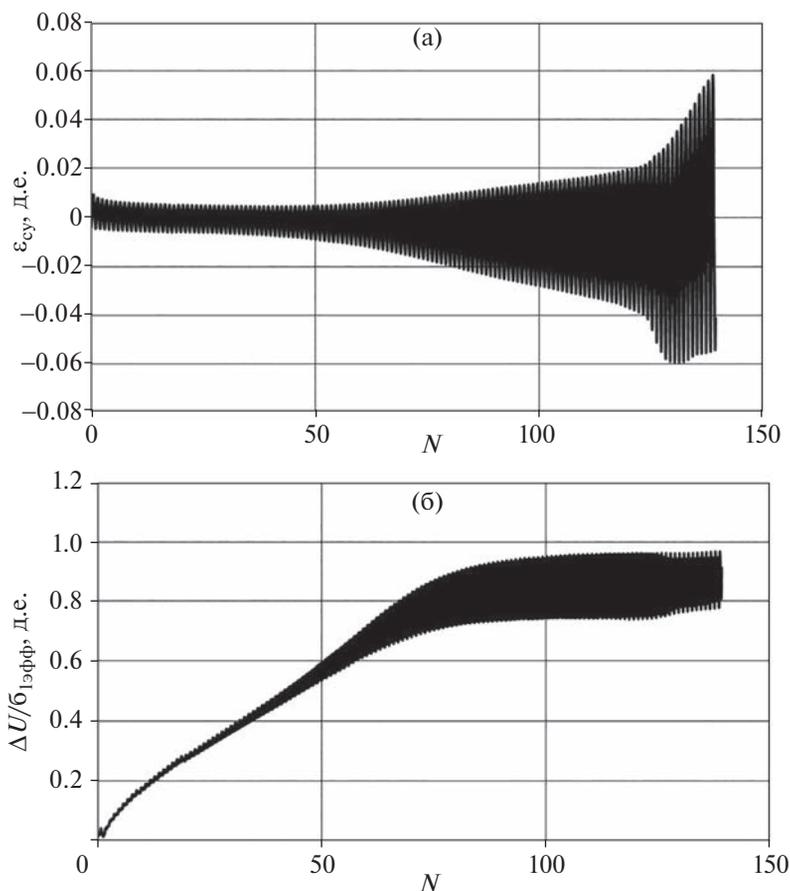


Рис. 5. Характерные диаграммы записей результатов длительных экспериментов: а – развитие циклических деформаций сдвига ϵ_{cy} по циклам нагружения N ; б – то же для относительного порового давления $\Delta U/\sigma_{1эфф}$.

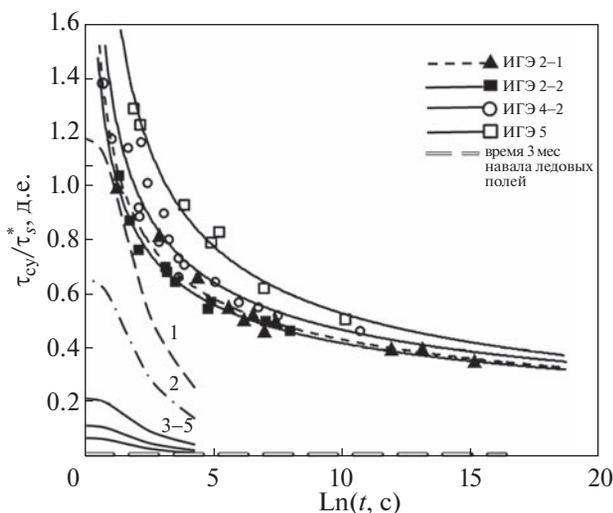


Рис. 6. Диаграммы изменения во времени нормированной прочности τ_{cy}/τ_s^* для грунтов ИГЭ 2–1, ИГЭ 2–2, ИГЭ 4–2, ИГЭ 5. Двойная прямая линия – время 3 мес навала ледовых полей. Максимальная ледовая нагрузка: 1 и 2 – на кровле и подошве слоя ИГЭ 2–1 соответственно, 3–5 – в слоях ИГЭ 2–2, ИГЭ 4–2 и ИГЭ 5 соответственно.

течение трех зимних месяцев. В рамках этого временного интервала можно дать общую предварительную оценку устойчивости грунтов к навалу ледовых полей.

Длительность воздействия, соответствующая этому интервалу, согласно экспериментальным данным и прогнозным графикам (см. рис. 6), может обусловить потерю прочности грунтами при циклических нагрузках, составляющих $\tau_{cy}/\tau_s^* = 0.38–0.42$ д.е.

Наиболее чувствительными к воздействию навала ледовых полей оказались грунты ИГЭ 2–1 и 2–2, представленные суглинками мягкопластич-

ными и супесями текучими. Наименее подвержены влиянию супеси пластичные (ИГЭ 4–2), а также суглинки и глины мягкопластичные (ИГЭ–5), залегающие в нижней части грунтовой толщи.

При грубой оценке можно заключить, что длительные циклические нагрузки с напряжениями сдвига τ_{cy} , не превышающими ~40% от статического предельного напряжения сдвига τ_s^* , не приведут к разрушению грунта. Уточнение предварительной оценки устойчивости грунтов выделенных ИГЭ, полученной по результатам экспериментов, может быть выполнено с учетом параметров, рассчитанных для упомянутого выше БК.

Основываясь на оценке возможных максимальных и минимальных циклических напряжений сдвига при ледовой нагрузке, рассчитанных для БК, можно сравнить их с данными табл. 3, содержащими значения предельных статических напряжений сдвига для грунтов.

Сопоставление характеристик статических нагрузок (см. табл. 3) с результатами оценки максимальных и минимальных циклических напряжений сдвига при воздействии ледовых полей показано в табл. 4.

Для длительного зимнего периода (до трех месяцев воздействия ледового поля), поведение грунтов можно оценивать на основе анализа минимальных значений сдвигающих ледовых нагрузок. Как видно, величина τ_{cy}/τ_s^* при этом не превышает 24% для ИГЭ 2–1 и грунтов нижележащих слоев.

При максимальных ледовых нагрузках, пороговое 40-процентное значение доли циклической нагрузки или относительной амплитуды циклических напряжений сдвига превышено для грунтов ИГЭ 2–1, ИГЭ 2–2. Однако эта оценка дана для максимальных параметров ледовых полей, занимающих лишь часть временного спектра всего процесса движения и навала.

Таблица 4. Сопоставление характеристик статических нагрузок и циклических напряжений сдвига

Номер ИГЭ	Расчетная поддонная глубина, м	Характеристика грунтов	Предельные напряжения сдвига, при нагрузках, МПа		Доля циклической нагрузки, τ_{cy}/τ_s^* , % макс-мин
			ледовых, τ_{cy}^* макс-мин	статических, τ_s^*	
2–1	1.0	Суглинки мягкопластичные	0.049–0.010	0.041	120 – 24
2–1	2.9	Суглинки мягкопластичные	0.032–0.008	0.048	67 – 17
2–2	4.3	Супеси текучие	0.027–0.007	0.058	47 – 12
4–2	16.0	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого	0.009–0.002	0.125	7 – 1
5	17.6	Глины и суглинки мягкопластичные, известковистые	0.008–0.001	0.076	11 – 1

Уточненный прогноз может быть дан с учетом распределения ледовых нагрузок по величине в течение зимнего периода (декабрь—февраль). В этом случае изменение во времени нормированных ледовых нагрузок τ_{cy}/τ_s^* может выглядеть следующим образом (см. рис. 6). Пунктиром представлены графики изменения максимальной ледовой нагрузки на кровле и подошве слоя ИГЭ 2–1 (линии 1 и 2), сплошными линиями (3–5) — в слоях остальных ИГЭ: 2–2, 4–2, 5. Нормированные циклические напряжения, вызванные воздействиями максимальных ледовых нагрузок, не достигают предельных значений для ИГЭ 2–2, а также нижележащих слоев (ИГЭ 4–2 и 5).

Максимальные циклические напряжения сдвига при воздействии ледовых полей близки к полученным в опытах значениям τ_{cy}/τ_s^* лишь для кровли слоя ИГЭ 2–1, но не превышают их.

Таким образом, грунтовое основание в рассматриваемом случае можно считать устойчивым к многократным циклическим воздействиям от навала ледовых полей. Закрепление сооружения сваями может уменьшить действующие циклические напряжения сдвига и создаст дополнительный запас прочности для верхней части придонного слоя грунтов ИГЭ 2–1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Воздействия движения ледовых полей, циклический характер которых определяется гидрометеорологическими факторами, морфометрическими характеристиками (толщиной льда), а также кинематическими параметрами (скоростью движения), обуславливают возникновение значительных нагрузок на сооружения, опирающиеся на грунт.

При этом если металлические или железобетонные конструкции с проектными характеристиками выдерживают ледовый натиск, то дисперсные, водонасыщенные грунты основания могут испытывать деградацию своей прочности, обуславливая снижение устойчивости сооружения в целом.

Для оценки реакции грунтового основания, как цели исследований, *разработана и опробована* методология, включающая ряд этапов:

- расчет параметров воздействия;
- моделирование влияния воздействий на прочность грунтов лабораторными испытаниями образцов на циклический сдвиг;
- анализ результатов и оценка реакции грунтов на циклические воздействия, моделирующие нагрузки от движения ледовых полей.

Следуя этой методологии, на основе имеющихся данных о гидрометеорологических условиях, морфометрии льда и массо-габаритных харак-

теристиках сооружения, проведены расчеты амплитуд и периодов нагрузок для моделирования воздействия движения ледовых полей.

Для оценки частоты действия нагрузок предложена методика расчета полного времени действия цикла нагружения $T_0 \approx T + t + t_1$, включающего отрезок времени t_1 между моментом разрушения и началом нового цикла, а также времени накопления T и спада напряжения t .

Лабораторное моделирование процесса выполнялось в приборах циклического сдвига на образцах дисперсных грунтов природного разреза, при рассчитанных параметрах воздействий. Итогом моделирования явилось сопоставление циклических предельных напряжений сдвига τ_{cy}^* , полученных при различном количестве циклов нагружения N^* , с уровнем предельных статических напряжений τ_s^* .

Анализ результатов экспериментов показал:

- снижение прочности грунтов при изменении характера воздействия с монотонно возрастающего статического на знакопеременное циклическое;

- величина снижения прочности обусловлена амплитудой и длительностью приложения переменной нагрузки, т.е. параметрами, определяемыми гидрометеорологическими условиями площадки и свойствами льда. Граничное значение амплитуды длительной циклической ледовой нагрузки, не приводящей к разрушению, для принятых условий оценивается величиной ~ 0.4 д.е. от предельного статического напряжения сдвига τ_s^* ;

- накопление циклов нагружения сопровождается постепенным повышением порового давления, при этом процесс разрушения может быть обусловлен перераспределением нагрузок между скелетом и поровой жидкостью. В отличие от монотонной нагрузки возвратно-поступательное циклические перемещения частиц могут вызывать изменение их ориентации, перекомпоновку, временную локальную потерю контактов в минеральном скелете и возможное восприятие нагрузки средой в поровом пространстве. В изученном грунтовом основании это наиболее характерно для менее дисперсных супесей текучих и пластичных ИГЭ 2–2 и ИГЭ 4–2;

- частота нагружения в принятом по результатам расчетов диапазоне 0.8–1.5 Гц не оказывает существенного влияния на результат.

Заключительным и существенным этапом в оценке реакции грунтов является рассмотрение сценария взаимодействия сооружения с движущимися льдами. Итогом должен стать прогноз поведения грунтов с учетом распределения ледовых нагрузок по величине в течение зимнего периода (декабрь—февраль).

Для рассматриваемого сооружения такой анализ показал, что возможные максимальные ледовые нагрузки при воздействии близки к предельным значениям циклических напряжений сдвига лишь для кровли слоя ИГЭ 2–1, но не превышают их.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутергин В.Н., Манукин А.Б., Панков К.В., Кальберген Р.Г., Карпенко Ф.С. Оценка изменения прочности грунтов при циклических нагрузках, моделирующих воздействия штормовых волн на сооружение // *Геоэкология*. 2015. № 5. С. 450–459.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория упругости. М.: Наука, 1965.
3. СП 38.13330.2018 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения. М.: Минстрой, 2018. 101 с. <https://docs.cntd.ru/document/553863434>
4. Andersen K.H., Kleven A., Heien D. Cyclic soil data for design of gravity structures, *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988. V. 114. № 5. P. 517–539.
5. API RP*2N. Recommended practice for planning, designing and constructing structures and pipelines for Arctic conditions / Amer: Petroleum Inst. Bulletin. Dallas, 1995.
6. Eide O., Andersen K.H. Foundation engineering for gravity structures in the Northern North Sea. Norwegian Geotechnical Institute. 1984, Publication 154, pp. 1–48.

EVALUATION OF SOIL RESPONSE IN THE BASE OF ENGINEERING STRUCTURES TO THE IMPACT OF BULK ICE FIELDS

V. N. Kutergin^{a,*}, A. B. Manukin^a, F. S. Karpenko^a, and K. V. Pankov^a

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

^{*}*E-mail: vank@bk.ru*

The comprehensive assessment of possible degradation of soils under the influence of long-term cyclic load caused by the movement of ice fields included several stages. First, the procedure of calculating the expected parameters of the amplitude-frequency spectrum of impacts and the corresponding shear forces was performed. In the course of experiments using the calculated parameters and loads, the so-called Wohler curves characterizing the change in the strength of dispersed soils under cyclic influences were obtained. The following factors control the decrease in strength: the cyclic nature of loading, its amplitude and duration; whereas, its mechanism consists in the possible redistribution of stress between the mineral skeleton and the pore water. The final analysis of soil behavior was completed taking into account the cyclic ice load in winter period of the accepted duration. The results of soil-stability assessment in the ground base at the site in the northern part of the Caspian Sea shelf are presented.

Keywords: *soils, ice fields, impact parameters, cyclic loads, strength*

REFERENCES

1. Kutergin, V.N., Manukin, A.B., Pankov, K.V., Kal'bergenov, R.G., Karpenko, F.S. [Evaluation of changes in soil strength under cyclic loads simulating the impact of storm waves on a structure]. *Geoekologiya*, 2015, no. 5, pp. 450–459. (in Russian)
2. Landau, L.D., Lifshits, E.M. [Theoretical physics. Theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1965. (in Russian)
3. SP 38.13330.2018 [Loads and impacts on hydraulic structures]. Moscow, Minstroy Publ., 2018. 101 p. <https://docs.cntd.ru/document/553863434> (in Russian)
4. Andersen, K.H., Kleven, A., Heien, D. Cyclic soil data for design of gravity structures, *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, vol. 114, № 5, pp. 517–539.
5. API RP*2N. Recommended practice for planning, designing and constructing structures and pipelines for Arctic conditions. *Amer. Petroleum Inst. Bulletin*. Dallas, 1995.
6. Eide, O., Andersen, K.H. Foundation engineering for gravity structures in the Northern North Sea, Norwegian Geotechnical Institute, 1984, Publication 154, pp. 1–48.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 556.34/3.06:504.5

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО ЭКОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗ ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ЗОЛОТОВАЛА ЧИТИНСКОЙ ТЭЦ-1 (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

© 2023 г. И. А. Федоров^{1,*}, Л. И. Усманова^{1,**}

¹Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
ул. Недорезова, 16а, Чита, 672014 Россия

*E-mail: fedorowia@gmail.com

**E-mail: larisaum@mail.ru

Поступила в редакцию 20.03.2023 г.

После доработки 11.07.2023 г.

Принята к публикации 11.08.2023 г.

На основе анализа результатов мониторинга геологической среды за 2008–2022 гг. на территории размещения золотвала Читинской ТЭЦ-1, включавшего гидродинамические и гидрогеохимические наблюдения, дана оценка современного состояния подземных вод и показана динамика их трансформации. Проведенный корреляционный анализ гидродинамических данных указывает на взаимосвязь уровней в скважинах, значительно удаленных от золотвала, с уровнем воды в скважине, находящейся в непосредственной близости с ним. Данное обстоятельство совместно с результатами предшествующих исследований фильтрационных свойств грунтов, залегающих в основании чаши золотвала, и появлением восходящего родника подтверждают расширение зоны влияния техногенного объекта в юго-западном направлении. В воде скважин на юго-востоке от золотвала, вскрывающих водоносный горизонт на пути движения фильтрационного потока, концентрации сульфатов, бора, общая минерализация, общая жесткость превышают нормативные значения для питьевых вод на площади около 12 км². Химический состав воды из скважин, находящихся в юго-западном направлении от золотвала, в настоящее время близок к фоновым значениям показателей качества воды Читино-Ингодинского межгорного артезианского бассейна, однако состав вод родника, расположенного в 1 км юго-западнее третьей секции отвала, свидетельствует об его ухудшении. Проведенное исследование показало, что эксплуатация третьей секции золотвала Читинской ТЭЦ-1 создаст условия для распространения фронта загрязнения подземных вод в новом направлении и подтопления ранее не затронутых участков местности.

Ключевые слова: золотвал, подземные воды, наблюдательные скважины, уровень воды, гидродинамический режим, гидрохимические показатели, загрязнение, подтопление

DOI: 10.31857/S0869780923050041, **EDN:** FQCAOK

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на развитие альтернативных способов получения энергии и использование природных источников (солнечная энергия, сила ветра, тепловая энергия недр Земли и т.д.), тепловые электрические станции все еще остаются лидерами (70%) по производству электричества и тепла [16]. Загрязнение подземных вод в районах размещения золотвалов – накопителей отходов теплоэлектростанций, использующих в качестве топлива твердые горючие полезные ископаемые, большей частью обусловлено отсутствием надежных противофильтрационных конструкций (экранов, завес и т.д.), вследствие чего осветленные воды прудовотстойников через горизонт первичных зол рас-

пространяются в нижележащие слои [6, 18]. Значительный объем фильтрующейся воды вызывает подъем уровня подземных вод и подтопление прилегающей территории [6], на которой могут быть расположены жилые застройки, сельскохозяйственные угодья и социально значимые объекты инфраструктуры.

Читинская теплоэлектроцентраль № 1 (Читинская ТЭЦ-1) – крупнейший производитель энергетических ресурсов в Забайкальском крае, является источником тепловой энергии для г. Чита, действующий с 1965 г, которому в настоящее время нет альтернативы [13]. Начиная с 1973 г. [20], складирование твердых отходов производства осуществляется в трехсекционный золотвал



Рис. 1. Обзорная карта участка исследований (с ресурса Google Earth Pro).

общей площадью 1,7 км², расположенный на расстоянии 3 км к северо-западу от ТЭЦ-1 (рис. 1). Секция № 1 ввиду ее заполнения была выведена из эксплуатации в 2009 г. и впоследствии рекультивирована с применением природных грунтов с высадкой хвойных деревьев [10]. В настоящий момент действующей является секция № 2, состоящая из двух чаш: одна для приема золопulpы и осветления воды, вторая – для сброса осветленной воды из первой по самотечному трубопроводу. Отсутствие противодиффузионного экрана в секциях 1 и 2 золоотвала повлекло фильтрационные утечки техногенных вод, объем которых по различным оценкам составляет 550–800 м³/ч [1, 9], что естественным образом проявилось в виде загрязнения поверхностных и подземных вод [8], подтопления и заболачивания территории с образованием наледей и нарастанием процессов морозного пучения в зимнее время года [21]. Причины и непосредственные факторы возникновения неблагоприятных явлений выявлялись по результатам проведения многочисленных изыскательских и научно-исследовательских работ, итоги которых кратко обобщаются в материалах [7]. В обозримом будущем планируется ввод в эксплуатацию секции № 3 [9].

Цель настоящей работы – эколого-гидрогеологическая оценка современного состояния подземных вод территории в районе размещения золоотвала Читинской ТЭЦ-1, выявление возможных новых направлений негативного воздействия на геологическую среду и направленности изменения геологической ситуации.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования является водоносный комплекс нижнемеловых отложений доронинской свиты, широко распространенный на участке исследования в Черновском районе г. Чита, условно ограниченном с севера золоотвалом Читинской ТЭЦ-1, с востока – западным берегом оз. Кенон, с запада – восточной окраиной пос. Рудник Кадала, и с юга – летным полем Читинского аэропорта (см. рис. 1).

Исследования проведены на основе данных об уровненом режиме подземных вод, результатов химико-аналитических работ и дешифрирования космических снимков, полученных в результате мониторинга геологической среды в районе золоотвала ТЭЦ-1 Восточного Забайкалья в 2008–2022 гг. Программа мониторинга включала полевое обследование территории, отбор водных проб, лабораторные работы и измерения статического уровня воды в наблюдательных скважинах (кроме самоизливающейся № 37кд).

Проведение режимных наблюдений за уровнем и химическим составом подземных вод осуществлялось с учетом рекомендаций, изложенных в методических указаниях РД 153-34.1-21.325-98 [14] и рекомендациях П 78-2000 [12]. Замеры уровня подземных вод в наблюдательных скважинах проводились ежемесячно от верха трубы наземной части скважины. Глубина залегания уровня определялась электроконтактным уровнемером и фиксировалась по подаче звукового сигнала при достижении датчиком зеркала воды.

Опробование скважин осуществлялось в соответствии с требованиями ГОСТ 31861 [5] после предварительной прокачки с помощью погруж-

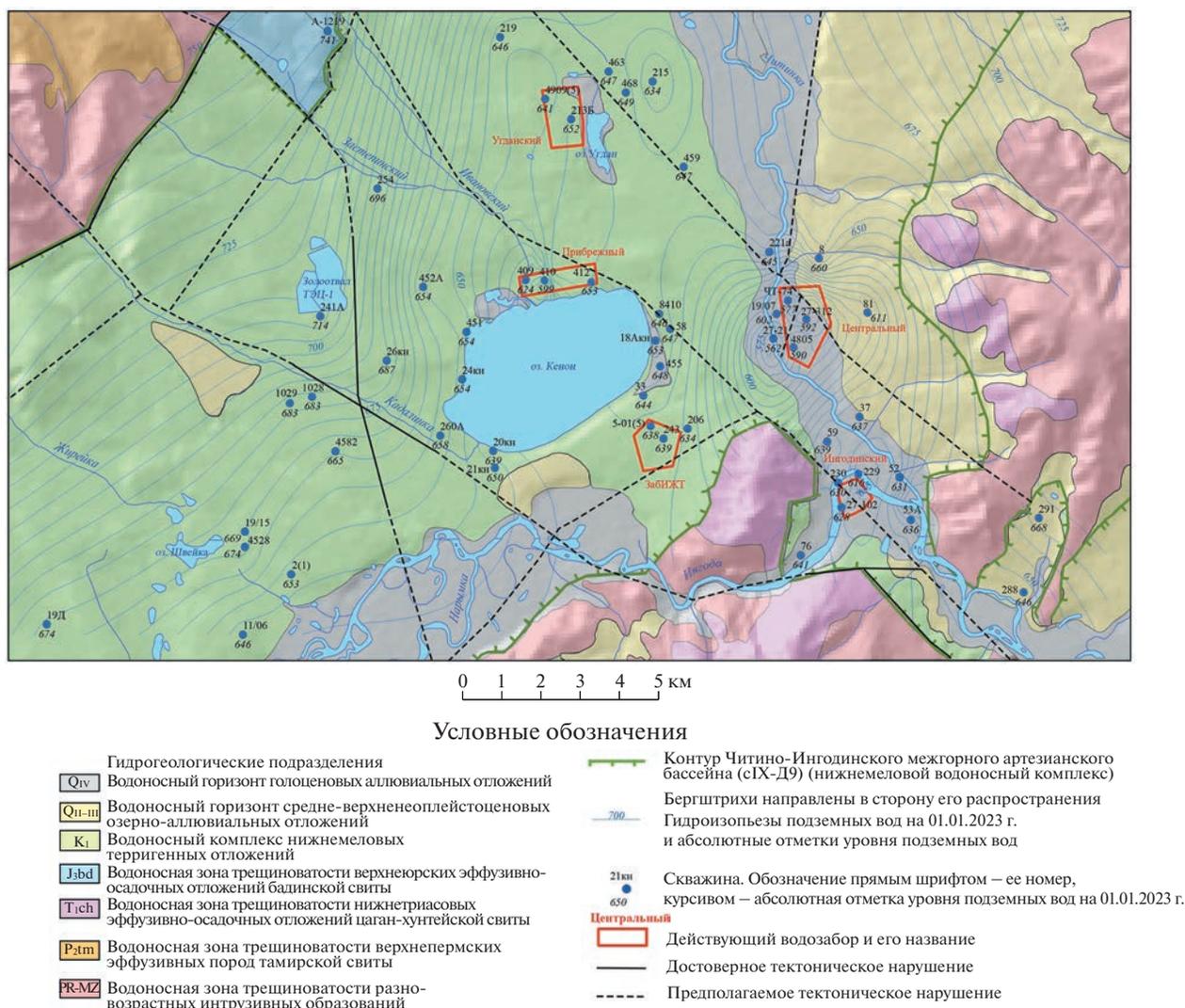


Рис. 2. Гидрогеологическая карта центральной части Читино-Ингодинского межгорного артезианского бассейна в пределах г. Чита (автор В.В. Карпов).

ного центробежного скважинного насоса КВР 3/48 (КИТТОРУ) производительность 0,3–0,7 л/с до замены 2–3 объемов столба воды в скважинах. Отобранные пробы подвергались полному химическому анализу на определение концентраций компонентов макросостава вод, 63 микроэлементов и основных физико-химических показателей в аттестованных и аккредитованных испытательных лабораториях (Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита; Институт геохимии СО РАН, г. Иркутск) современными химическими и инструментальными методами согласно требованиям стандартизованных методик [17]. Погрешности применяемых методик измерений отвечают установленным ГОСТ 27384 нормативам [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Читино-Ингодинский межгорный артезианский бассейн, в центральной части которого расположен участок исследования, относится к Малхано-Становой горно-складчатой области и протягивается в северо-восточном направлении между хребтами Яблонового и Черского [3]. По условиям формирования подземных вод в различных по составу, возрасту и генезису комплексах горных пород в пределах бассейна выделены гидрогеологические подразделения, представленные на рис. 2.

В пределах исследуемого участка распространены:

– *порово-пластовые воды* современных-верхнечетвертичных аллювиальных отложений, представленных песками различной крупности с про-

слоями песчано-гравийного, гравийно-галечного материала;

– *трещинно-пластовые*, большей частью напорные, воды нижнемеловых отложений доронинской свиты, сложенных песчаниками на глинистом, реже карбонатном цементе, чередующимися с водупорными аргиллитами и алевролитами (безугольная толща), и углистыми алевролитами и аргиллитами с пластами бурых углей (угольная толща);

– *трещинно-жилльные воды* зон разломов в районе долины р. Кадалинка [2].

Преимущественное распространение имеют трещинно-пластовые воды нижнемеловых отложений доронинской свиты (безугольной толщи). Воды характеризуются слабым местным напором, гидрокарбонатным кальциевым или магниевым составом; вскрыты на глубинах 16.9–29.0 м. Статические уровни устанавливаются на глубинах 16.9–25.8 м [6]. Удельные дебиты скважин при откачках 0.5–2.0 л/с с отдельными значениями до 3.6–4.05 л/с. Коэффициенты: фильтрации от 2.3 до 17.1 м/сут, водопроницаемости от 48.4 до 675 м²/сут, пьезопроводности – $8.5 \cdot 10^3$ – $3.9 \cdot 10^5$ м²/сут [7].

Трещинно-жилльные воды зон разломов вскрыты скважинами на глубинах 16.7–27.5 м в прибортовой части долины и 5–9 м в ее центральной части. Воды напорные, их статические уровни выше поверхности земли на 0.2–1.4 м. Дебиты скважин варьируют в пределах 8.5–55.5 л/с при понижениях 3.12–8.13 м. Значения коэффициентов водопроницаемости в зонах разломов находятся в пределах 209–430 м²/сут [7].

Поток подземных вод на рассматриваемом участке направлен к юго-востоку от золоотвала в сторону оз. Кенон и Читинского аэропорта, о чем свидетельствуют гидроизопэзы на гидрогеологической карте (см. рис. 2).

На характер распространения и движения вод большое влияние оказывают тектонические и геокриологические условия территории. Гидрогеологические условия на участке исследования во многом определяются наличием субмеридионального разлома (см. рис. 2) шириной от 270 до 320 м, проходящего восточнее золоотвала, по восточной части взлетно-посадочной полосы Читинского аэропорта и далее южнее по седловине, где расположено Кадалинское месторождение кирпичных глин.

До начала эксплуатации объектов ТЭЦ многолетнемерзлые породы (ММП) сливающегося и несливающегося типов занимали 30–35% исследуемой площади. Температура пород на глубине годовых колебаний 10 м изменялась в пределах –0.1°C – –1.0°C, на территории золоотвала ТЭЦ-1 – –0.1°C – –0.3°C [19]. Кровля ММП была вскрыта на глубине 3.0–5.0 м, подошва – на глубине 50–70 м. В результате влияния высокотемпературных

вод золоотвала произошла локальная деградация ММП в его пределах. Субмеридиональный разлом, вероятно, до начала эксплуатации золоотвала ТЭЦ-1 находился в законсервированном виде под влиянием многолетней мерзлоты [20], но в результате деградации ММП приобрел водопроницающую гидрогеологическую роль в районе золоотвала, а южнее, на территории летного поля аэропорта, по нему происходит разгрузка инфильтрационных вод.

В 2016 г. на территории исследования в результате проведения электрического зондирования [11] по двум профилям, расположенным с восточной (профиль 1, длина 1795 м) и южной (профиль 2, длина 1195 м) сторон золоотвала ТЭЦ-1 (рис. 3), было выделено два типа аномалий пониженного удельного электрического сопротивления пород. Первый тип, над опорным высокоомным горизонтом, соответствует надмерзлотному стоку техногенных вод на глубине около 10 м (профиль 1 в интервале 1200–1600 м). Второй тип – низкоомные аномалии, связан с фильтрацией по трещинам и разломам на глубинах 20–40 м (профиль 1 в интервале 1400–1700 м) и 13–20 м (профиль 2 в интервалах 300–500 м и 500–800 м). По данным электротомографии сопротивление обводненных пород составляет 20–30 Ом·м, что соответствует величине минерализации подземных вод 1 г/л [11]. Данные обстоятельства подтверждают местоположение основных зон фильтрации в южной и восточной частях золоотвала.

Согласно данным наблюдений за гидродинамическим режимом в период 2008–2022 гг. происходит повышение среднегодового уровня подземных вод (УПВ), что наглядно демонстрируют соответствующие линии тренда на графиках (рис. 4а, б, в). Количество атмосферных осадков в многолетнем плане также имеет тенденцию к росту ввиду наступления многоводного периода (рис. 4г), однако величина соответствующих годовых сумм осадков, по данным метеостанции г. Чита, имеет слабую взаимосвязь со среднегодовыми уровнями в рассматриваемых скважинах. Максимальный коэффициент линейной корреляции соответствующих пар данных “осадки–уровень подземных вод” не достигает 0.5. Это объясняется тем, что рассматриваемый водоносный комплекс мезозойских отложений располагается под слоем слабопроницаемых горных пород, а потому выпадение атмосферных осадков существенно не сказывается на изменении уровня напорных вод.

Гидродинамический режим наиболее близко расположенной к золоотвалу скв. 241А формируется преимущественно под его влиянием, и наиболее вероятной причиной колебаний уровня воды в ней может быть непостоянный гидравлический напор, вызванный либо повышением положения уреза во-

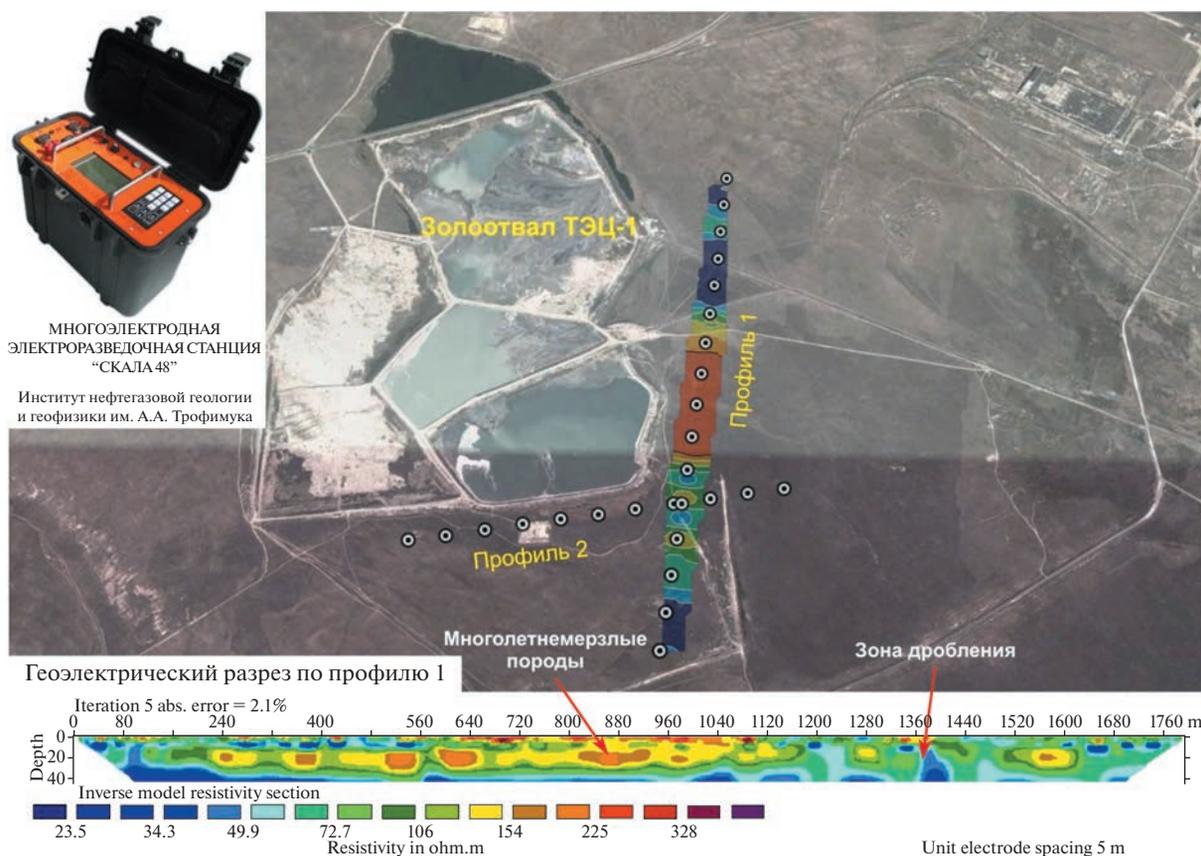


Рис. 3. Схема геофизического исследования территории и геоэлектрический разрез по профилю 1 [11].

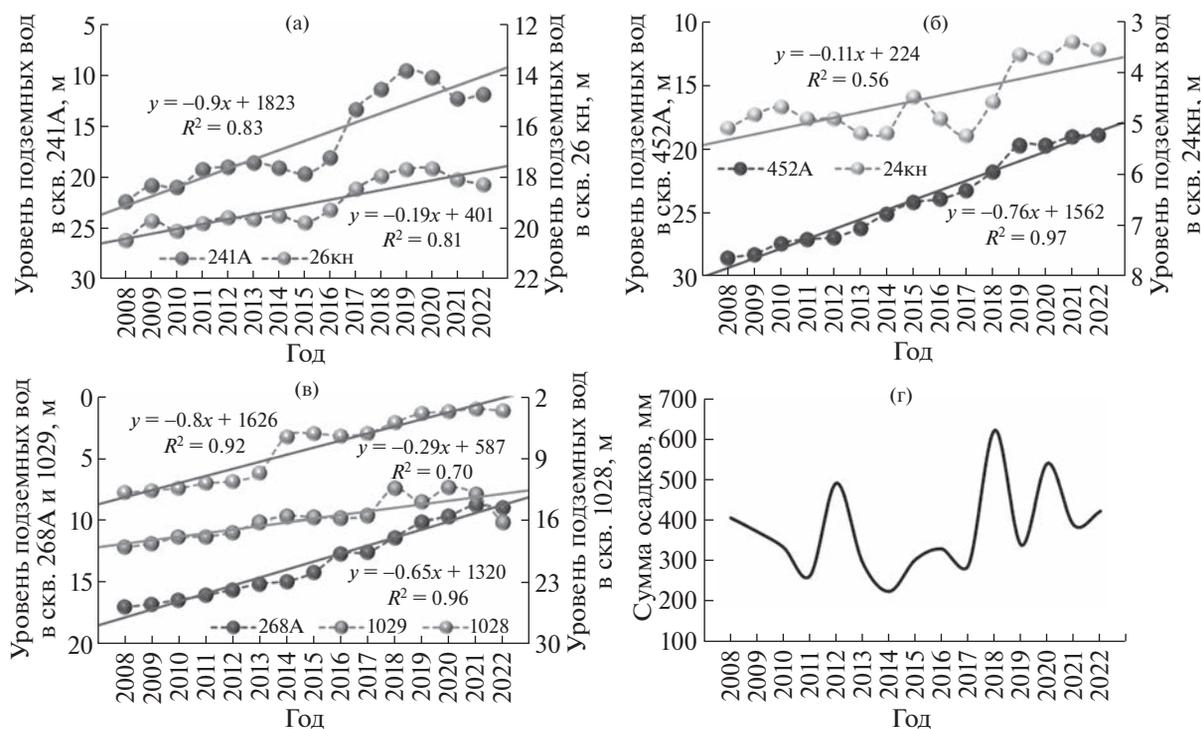


Рис. 4. Динамика среднегодового уровня подземных вод в скважинах на участке золототвала ТЭЦ-1 (а, б, в) и сумма атмосферных осадков по г. Чита (г) за период с 2008 по 2022 г.

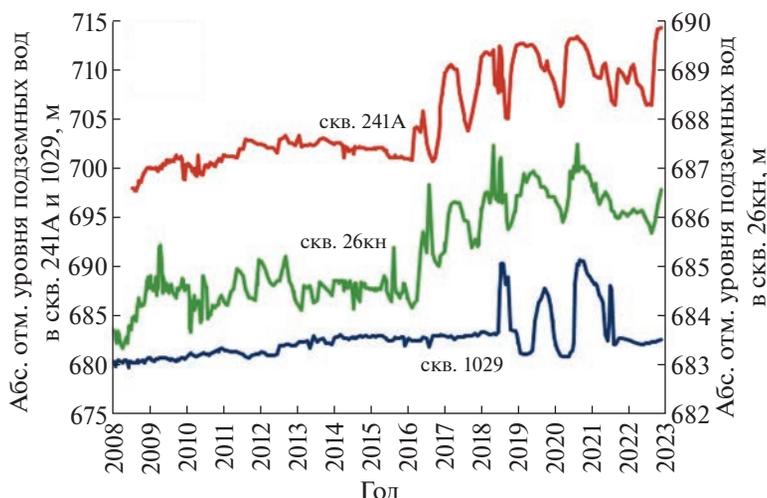


Рис. 5. Графики ежемесячных режимных наблюдений по скважинам 26кн, 241А и 1029 за период с 2008 по 2022 г.

ды в акватории золоотвала, либо изменением ее площади. Значительный подъем уровня в скв. 241А отмечается в 2017 г., а в скв. 26кн, расположенной в 1.6 км юго-восточнее золоотвала, резкого изменения амплитуды не отмечено; среднегодовые кривые подобны, что говорит о взаимосвязи этих скважин с золоотвалом (см. рис. 4а).

В скв. 452А, расположенной между золоотвалом и п. Энергетиков, с 2008 по 2022 г. УПВ поднялся практически на 10 м, в то время как увеличение среднегодового уровня по скв. 24кн происходит медленнее, чем в остальных, о чем свидетельствует довольно низкое значение коэффициента детерминации к аппроксимирующей линии тренда на графике (см. рис. 4б). Возможно, это связано с тем, что эта скважина находится на западном берегу оз. Кенон, положение уреза вод которого значительно не изменяется (абсолютная отметка колеблется около 653 м), поэтому максимальная амплитуда колебаний подземных вод за 14 лет не превышает 2 м.

Повышение УПВ в скважинах, расположенных в северо-западной оконечности летного поля Читинского аэропорта (268А, 1028), более устойчиво (см. рис. 4в), о чем говорят коэффициенты парной линейной корреляции, близкие к единице (0.98 и 0.96 соответственно). Динамика среднегодового уровня воды в скв. 1029 несколько отличается от предыдущих двух скважин — за период 2020–2022 гг. наблюдается его снижение на 2.8 м на фоне общей тенденции роста УПВ на исследуемой территории.

Детальный анализ графиков ежемесячных режимных наблюдений показал, что в скв. 241А и 1029 периодически происходят резкие перепады уровня воды, начавшиеся во второй половине 2010-х годов. (рис. 5). В то же время в скв. 268А и

1028, расположенных рядом со скв. 1029, подобных “скачков” уровня не установлено. По-видимому, это обусловлено тем, что эти три скважины вскрывают разные горизонты нижнемелового водоносного комплекса. Между тем, в динамике уровня по наблюдательной скв. 26кн, находящейся на пути распространения фильтрационного потока от золоотвала, резких перепадов, как в скв. 241А, не наблюдается (см. рис. 5). Вероятно, последнее обстоятельство связано с литологическими особенностями состава мезозойских отложений, слагающих разрезы данных скважин, и разной удаленностью от источника возмущающего воздействия.

Нарушение естественного режима УПВ может быть вызвано их отбором и фильтрационным процессом из искусственных поверхностных водоемов, в которые поступает вода. Два этих случая наглядно выражены гидроизопьезами на гидрогеологической карте — понижение УПВ с образованием депрессионной воронки в центре группового водозабора и его повышение на участке между золоотвалом и оз. Кенон (см. рис. 2). Колебания уровня в зоне влияния фильтрационного потока от золоотвала около определенной величины указывает на его относительную стабилизацию, что наблюдалось до середины 2010-х годов по скв. 26кн (см. рис. 5). Обусловлено это относительно установившимся равновесием между приходной и расходной частями водного баланса, а именно: постоянный гидравлический напор, создаваемый положением уреза воды в отстойнике золоотвала (абсолютная отметка колеблется около 715 м); неизменная площадь его акватории; непрерывная разгрузка фильтрующихся из золоотвала техногенных вод в долину р. Кадалинка в виде родников, а также через вскрытый самоизливающейся скв. 37кд

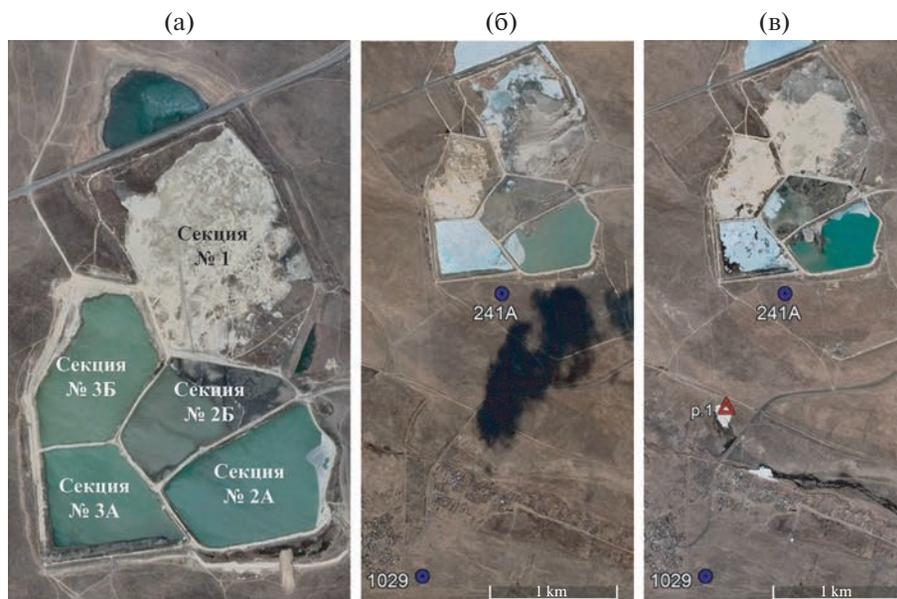


Рис. 6. Космоснимки территории, прилегающей к золоотвалу Читинской ТЭЦ-1 (ресурс Google Earth Pro): а – расположение секций золоотвала; б – 05.04.2016 г.; в – 15.04.2018 г.

водоносный горизонт, расположенной на левом борту реки у подножья склона.

Поскольку гидродинамический режим скв. 241А формируется преимущественно под воздействием золоотвала, то причиной значительных колебаний уровня воды в ней может быть только непостоянный гидравлический напор, вызванный либо повышением положения уреза воды в акватории, либо изменением ее площади. Интерпретация космоснимков с ресурса Google Earth Pro показала, что в период с 2016 по 2020 г. в новую третью секцию золоотвала производились сбросы технологических сточных вод, а также позволила обнаружить появление в 2017 г. восходящего родника в центре между золоотвалом и скв. 1029 (рис. 6).

Для подтверждения предположения о влиянии золоотвала на режим подземных вод в юго-западном направлении был проведен корреляционный анализ гидродинамических данных по скважинам 1029, 26кн и 241А за период с 2008 по 2022 г. Ввиду различной удаленности этих скважин от источника техногенного воздействия на подземные водоносные горизонты, волна, создаваемая гидростатическим давлением столба воды на ложе золоотвала, доходит в разные точки не одновременно, а с некоторым опозданием, поэтому для корректного сопоставления данных анализ проведен с учетом соответствующего временного интервала.

Статистическая обработка результатов наблюдений показала тесноту взаимосвязи гидродинамического режима скв. № 26кн и 1029 с уровнем воды в скв. № 241А в разные периоды времени.

Представленные на рис. 7 графики наглядно демонстрируют силу корреляции при варьировании объема выборки данных.

Для всех выбранных периодов времени и разных объемов данных подтверждается очень тесная взаимосвязь уровней воды в скв. 26кн и № 241А (табл. 1), что также очевидно при сопоставлении графиков ежемесячных режимных наблюдений по этим двум скважинам (см. рис. 5) и химическому составу воды (табл. 2). Результаты корреляционного анализа показывают, что взаимосвязь между скв. 1029 и 241А явно прослеживается в период “дестабилизации” уровня режима в первой и усиливается с уменьшением выборки данных, корреляционные коэффициенты r превышают критические значения для соответствующих объемов выборок с доверительной вероятностью 95% ($\alpha = 0.05$), что свидетельствует о значимости корреляции (см. табл. 1).

Проведенные ранее исследования [1] фильтрационных свойств грунтов, залегающих в основании ложа новой третьей секции, показали, что они обладают довольно высокой проницаемостью с коэффициентами фильтрации 12 м/сут и более. При заданных параметрах мощности противофильтрационного суглинистого экрана менее 1 м, слое обводненной пульпы над ним порядка 10 м и низкого положения УПВ, создавшиеся напорные градиенты $I \leq 10$ могут вызвать в нем суффозионные деформации с образованием фильтрационных каналов, что значительно увеличит коэффициент фильтрации подстилающих грунтов и приведет к повышению объемов утечек техногенных вод [1]. Принимая во внимание эти

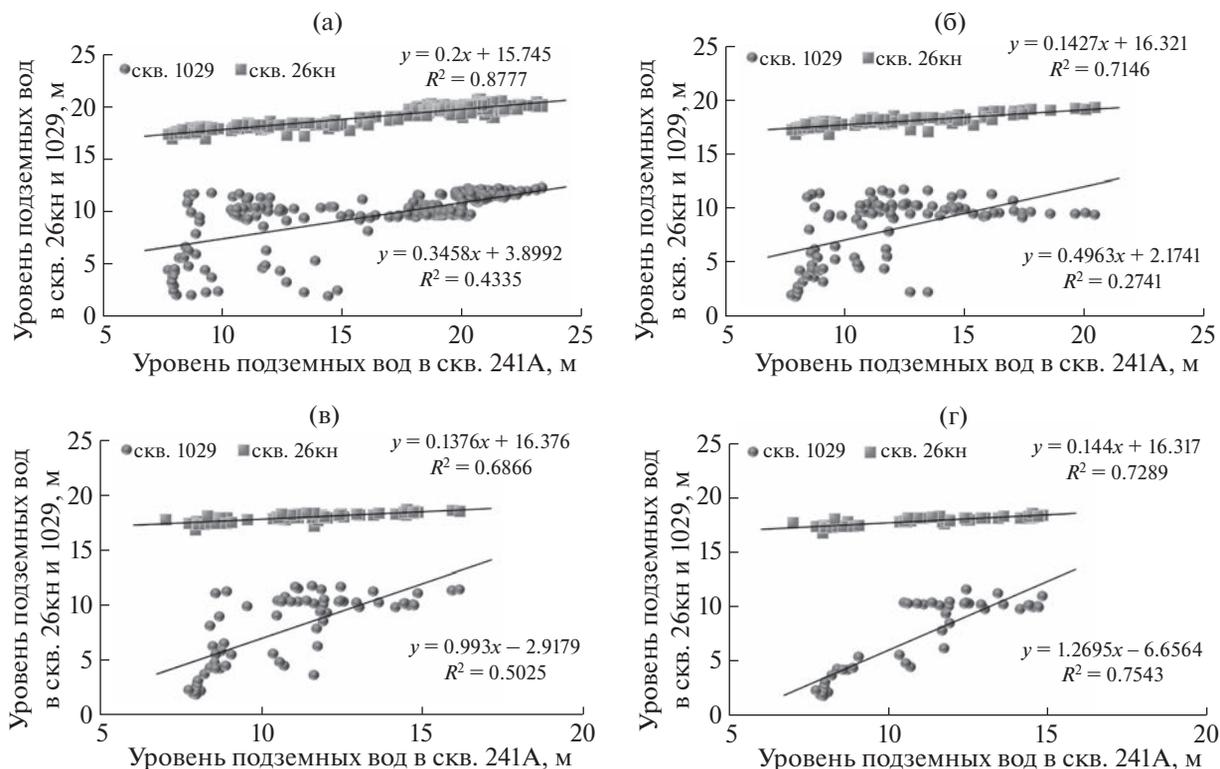


Рис. 7. Взаимосвязь уровней воды в скв. 26кн и 1029 с уровнем воды в скв. 241А за различные интервалы времени: а – 2008–2022 гг.; б – 2016–2022 гг.; в – 2018–2022 гг.; г – 2020–2022 гг.

обстоятельства, появление родниковой разгрузки к юго-западу от золоотвала, резкие колебания статического уровня воды в скв. 1029, согласующиеся со скв. 241А при непостоянных сбросах в новую секцию, указывают на проявляющееся негативное воздействие техногенного объекта в северо-западной части летного поля аэропорта, ко-

торое может усилиться при вводе данной секции в эксплуатацию.

Подземные воды Читино-Ингодинского артезианского бассейна по химическому составу гидрокарбонатные, среди катионов преобладают натрий и кальций. Минерализация изменяется в пределах 100–500 мг/л и редко достигает 1000 мг/л.

Таблица 1. Результаты корреляционного анализа данных уровня воды в скважинах 26кн и 1029 с уровнем воды в скважине 241А в различные периоды времени

Скважина	Период	Объем выборки	Корреляционные показатели		
			Критическое значение коэффициента корреляции при уровне значимости $\alpha = 0.05$	Коэффициент корреляции, r	Сила корреляции
26кн	2008–2022 гг.	271	0.120	0.937	очень высокая
	2016–2022 гг.	97	0.200	0.845	высокая
	2018–2022 гг.	68	0.239	0.829	высокая
	2020–2022 гг.	48	0.285	0.854	высокая
1029	2008–2022 гг.	264	0.122	0.658	средняя
	2016–2022 гг.	95	0.202	0.524	средняя
	2018–2022 гг.	64	0.246	0.709	высокая
	2020–2022 гг.	44	0.297	0.869	высокая

Таблица 2. Некоторые гидрохимические показатели технологических сточных вод золоотвала Читинской ТЭЦ-1 и подземных вод прилегающей территории за период 2008–2022 гг.

Объект опробования	Гидрохимические показатели						
	pH	Жесткость общая, °Ж	Минерализа- ция общая, мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	F ⁻ , мг/л	B, мг/л
ЗО, n = 16	8.33 – 10.00	11.5 – 23.2	768 – 1525	406 – 1010	65.2 – 372	5.87 – 15.2	1.68 – 3.39
	9.03	15.2	1114	619.4	84.7	10.5	2.77
241А, n = 19	7.00 – 7.73	13.8 – 20.5	1200 – 1480	568 – 762	72.7 – 94.8	1.75 – 7.30	1.62 – 3.21
	7.23	16.6	1321	674.5	85.7	5.06	2.52
26кн, n = 19	6.40 – 7.20	14.5 – 18.5	1176 – 1560	601 – 765	40.0 – 81.5	1.25 – 2.82	0.49 – 1.25
	6.90	16.1	1284	652.6	40.0	1.80	0.93
37кд, n = 17	6.80 – 7.76	15.1 – 18.1	1234 – 1405	397 – 723	49.0 – 74.8	1.50 – 3.48	0.80 – 1.56
	7.24	16.0	1280	612.3	60.1	2.53	1.21
24кн, n = 17	7.20 – 7.70	6.35 – 8.77	547 – 849	47.6 – 129.8	22.4 – 69.1	1.28 – 2.00	0.12 – 0.24
	7.05	7.55	735	82.7	49.2	1.52	0.17
452А, n = 5	6.80 – 7.70	17.9 – 25.8	1338 – 1860	221 – 409	11.6 – 25.9	0.12 – 0.25	0.018 – 0.063
	7.33	20.3	1610	302.4	18.3	0.18	0.045
268А, n = 15	6.82 – 7.50	4.69 – 6.80	425 – 640	24.5 – 82.7	2.00 – 9.96	0.20 – 0.42	0.005 – 0.036
	7.17	5.92	505.6	56.0	7.19	0.30	0.021
1028, n = 18	6.86 – 7.40	3.67 – 5.40	350 – 500	43.5 – 99.0	6.00 – 17.6	0.20 – 0.44	0.005 – 0.016
	7.07	4.40	399	62.1	9.41	0.30	0.012
1029, n = 7	7.04 – 7.80	1.85 – 7.00	206 – 564	52.5 – 146.4	10.5 – 36.0	0.10 – 0.83	0.005 – 0.006
	7.39	4.87	441.7	107.9	21.0	0.41	0.005
Родник*, n = 2	6.78 – 6.80	24.7 – 26.7	1953 – 2061	458 – 564	38.6 – 42.5	0.42 – 0.47	0.049 – 0.051
	6.79	25.7	2007	511	40.6	0.45	0.050
ПДК	6.0–9.0	7.0	1 000	500	350	1.5	0.5

Примечание. ЗО – золоотвал; $\frac{\text{минимум} - \text{максимум}}{\text{среднее}}$; n – число определений; * – по результатам опробования в 2021 и 2022 г.

Низкая минерализация 80–200 мг/л характерна для прибортовых частей впадины. Высокая минерализация 500–1000 мг/л и повышенное содержание сульфатов наблюдаются на участках с затрудненным водообменом (рис. 8): Черновская мулда (скв. 19/15), район оз. Угдан (скв. 468), участок золоотвала Читинской ТЭЦ-1. Общая жесткость изменяется в пределах 1–9.4°Ж. На отдельных участках артезианского бассейна встречаются повышенные содержания железа до 20 мг/л и выше, марганца до 5 мг/л, которые не связаны с техногенными источниками загрязнения [3].

В гидрохимическом плане в зоне распространения фильтрационного потока от золоотвала (скв. 241А, 26кн, 37кд) и на его периферии (скв. 24кн, 452А) в подземных водах отмечаются повышенные содержания некоторых компонентов, часто с превышением ПДК [15], которые не характерны для естественного фона Читино-Ингодинского межгорного артезианского бассейна

(см. табл. 2). Наиболее типичными индикаторами загрязнения являются сульфат-, хлорид-, фторид-ионы, бор и некоторые другие компоненты химического состава сточных вод золоотвала. Величина водородного показателя (pH) в подземных водах находится в отведенных границах ПДК, в то время как в золоотвале она достигает 10. Состав воды из восходящего родника, образовавшегося в 2017 г. в 1 км юго-западнее третьей секции гидротехнического сооружения, свидетельствует о разгрузке фильтрующихся вод золоотвала в данной точке (см. табл. 2). В химическом составе воды из скважин, расположенных с северо-западной стороны летного поля Читинского аэропорта (268А, 1028 и 1029), компонентов сточных вод золоотвала в повышенных концентрациях не обнаружено.

В зоне влияния золоотвала распространены воды с преобладанием в анионном составе сульфат-иона. Диаграмма Пайпера наглядно показывает химическую типизацию исследованных вод

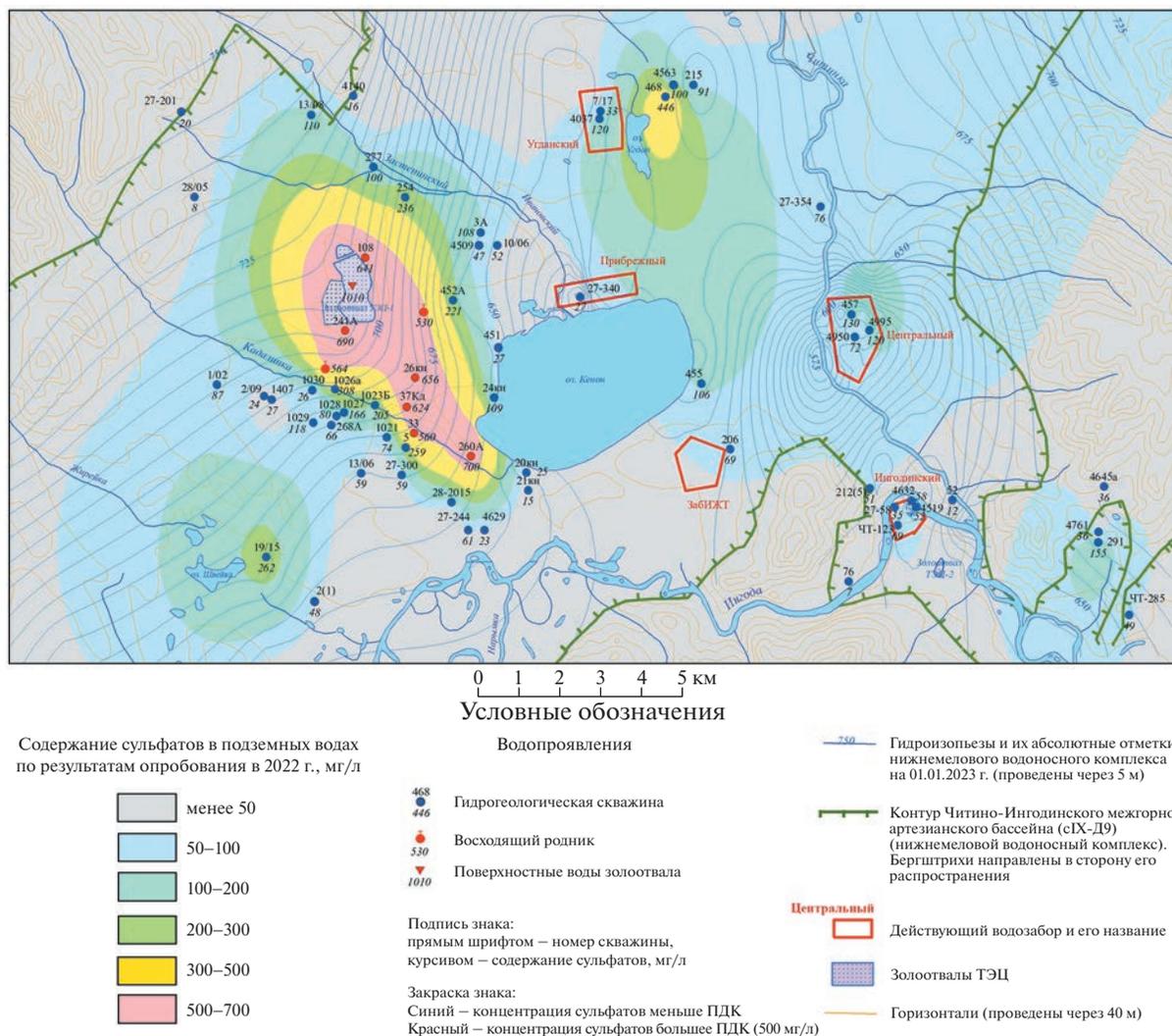


Рис. 8. Карта распространения сульфатов в центральной части Читино-Ингодинского межгорного артезианского бассейна в пределах г. Чита (автор В.В. Карпов).

(рис. 9а). Результаты многолетних наблюдений за химическим составом подземных вод на участке исследований по скв. 37кд позволяют проследить изменение концентрации сульфатов в юго-восточном направлении. Данная динамика отвечает изменениям в содержании сульфатов в золоотвале (см. рис. 9б).

Площадь загрязнения подземных вод в районе золоотвала Читинской ТЭЦ-1 в настоящее время оценивается приблизительно в 12 км² (см. рис. 8). С учетом обстоятельств, связанных с установленными закономерностями изменения гидродинамического режима подземных вод, и принимая во внимание тенденцию распространения фронта загрязнения на юго-восток, можно ожидать расширения границы ореола в юго-западную сторону от золоотвала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов предшествующих работ и фактического материала, полученного в рамках настоящего исследования, позволяет сделать заключение о высокой вероятности расширения зоны влияния золоотвала Читинской ТЭЦ-1 в случае ввода в эксплуатацию третьей секции. Это влияние в первую очередь проявится в повышении уровня подземных вод в юго-западном направлении от золоотвала, что неминуемо приведет к увеличению расхода в точках существующих разгрузок и подтоплению находящихся с ними рядом жилых застроек, а также создаст условия для подтопления ранее не затронутого участка аэропортового комплекса – западной оконечности взлетно-посадочной полосы.

Данные о химическом составе исследованных подземных вод в зоне влияния золоотвала под-

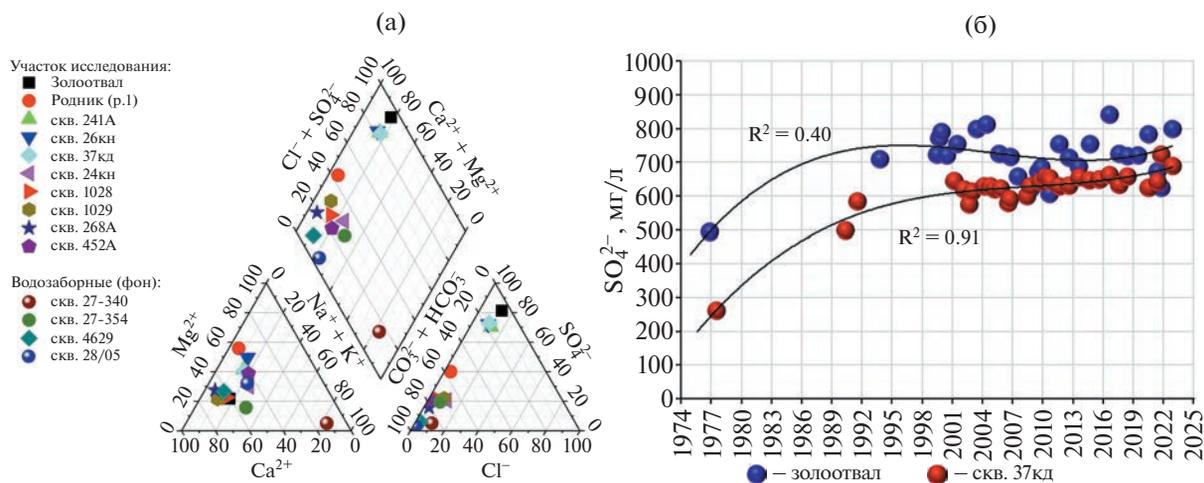


Рис. 9. Диаграмма Пайпера с нанесением данных по химическому составу подземных вод Читино-Ингодинского межгорного артезианского бассейна в 2022 г., % эквивалентов (а) и изменение концентрации сульфатов на участке золоотвала Читинской ТЭЦ-1 за период 1977–2022 гг. (б).

тверждают проведенные ранее гидрохимические исследования. Водоносные горизонты, вскрываемые скважинами, расположенными с северо-западной стороны летного поля аэропорта, в настоящее время не имеют признаков явного загрязнения водами золоотвала, однако концентрации веществ-индикаторов в воде восходящего родника подтверждают происходящую трансформацию химического состава подземных вод. Площадь химического загрязнения нижнемелового водоносного комплекса компонентами золошлаковых отходов в настоящее время сохраняется на прежнем уровне, но через определенный период времени в созданных условиях фронт загрязнения может распространиться и в новом направлении, что грозит ухудшением экологической обстановки в данной местности.

Авторы выражают глубокую признательность за помощь в проведении исследований главному гидрогеологу ГУП «Забайкалгеомониторинг» Виктору Васильевичу Карпову.

Работа выполнена в рамках темы госзадания ИПРЭК СО РАН (№ госрегистрации 121032200070-2, «Геоэкология водных экосистем Забайкалья в условиях современного климата и техногенеза, основные подходы к рациональному использованию вод и их биологических ресурсов»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабелло В.А., Беляков А.Е. К вопросу о надежности экранирования ложа золоотвалов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2005. № 8 (560). С. 93–97.
2. Богомолов Н.С., Орлова Л.М., Гераков Н.Н. и др. Гидрогеология СССР. Читинская область. М.: Недра, 1969. Т. XXI. 444 с.
3. Верхотуров А.Г., Цыганок В.И., Карпов В.В. и др. Гидрогеология Забайкальского края. Чита: ЗабГУ, 2017. 240 с.
4. ГОСТ 27384–2002. Вода. Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств. М.: Стандартинформ, 2010. 6 с.
5. ГОСТ 31861–2012. Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2013. 32 с.
6. Делицын Л.М., Ежова Н.Н., Власов А.С., Сударева С.В. Золоотвалы твердотопливных тепловых электростанций как угроза экологической безопасности // Экология промышленного производства. 2012. № 4. С. 15–26.
7. Замана Л.В., Усманов М.Т., Борзенко С.В. и др. Гидрогеологические условия и источники подтопления летного поля Читинского аэропорта «Кадала» // Подземная гидросфера / Под ред. С.В. Алексева. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. С. 466–470.
8. Замана Л.В., Аскарлов Ш.А., Усманова Л.И. и др. Загрязнение подземных и поверхностных вод в зоне влияния фильтрационных утечек гидрозолоотвала Читинской ТЭЦ-1 // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов / Ред. Ю.О. Риккер. Чита: ЗабГУ, 2020. С. 78–82.
9. Кондратьев В.Г. Из опыта предпроектных научных проработок вариантов размещения новых площадок при реконструкции золоотвала Читинской ТЭЦ-1 // Экология водоемов – охладителей энергетических станций / Отв. ред. Г.Ц. Цыбекмитова. Чита: ЗабГУ, 2017. С. 153–157.
10. Миронов А.В. Опытная биологическая рекультивация золошлакового материала Читинской ТЭЦ-1 // Природообустройство. 2019. № 4. С. 29–33.
11. Оленченко В.В., Усманов М.Т., Усманова Л.И., Цыренжапов С.В. Выявление путей миграции техногенных вод из гидротехнических сооружений методом электромографии (на примере золоотвала Читинской ТЭЦ-1) // Международный журнал

- прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 1–1. С. 101–105.
12. П 78-2000. Рекомендации по контролю за состоянием грунтовых вод в районе размещения золоотвалов ТЭС. СПб.: ОАО “ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева”, 2000. 28 с.
 13. Печников М.А., Грачев А.В., Дьячков А.А., Батухтин А.Г. Общая характеристика Читинской ТЭЦ-1 // Инновационные технологии в технике и образовании / Отв. ред. Л.С. Романова. 2016. С. 62–66.
 14. РД 153-34.1-21.325-98. Методические указания по контролю за режимом подземных вод на строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанциях. М.: ОРГРЭС, 1999. 36 с.
<https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4294817/4294817782.htm>
 15. СанПиН 1.2.3685-21. Санитарные правила и нормы. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. 2021. 469 с.
<https://fsvps.gov.ru/sites/default/files/npa-files/2021/01/28/sanpin1.2.3685-21.pdf>
 16. Сунгатуллин Р.Х., Хазиев М.И. Грунтовые воды и энергетические комплексы (на примере Казанской ТЭЦ-1) // Ученые записки Казанского университета. Естественные науки. 2013. Т. 155. № 1. С. 101–122.
 17. Фомин Г.С. Вода. Контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по международным стандартам. М.: Протектор, 2010. 1008 с.
 18. Целюк Д.И. Особенности техногенного воздействия золоотвалов Средней Сибири на подземные воды: дисс. ... канд. геол.-мин. н. Красноярск, 2009. 162 с.
 19. Шестернев Д.М., Лапкин Г.И. Геоэкологические проблемы реконструкции тепловых электростанций объединенной энергетической системы Сибири и пути их решения (на примере ТЭЦ-1, г. Чита) // Вестник ЧитГУ. 2009. № 1 (52). С. 156–160.
 20. Шестернев Д.М., Лапкин Г.И., Татауров С.Б., Бянкин С.Н. Геоэкологические проблемы эксплуатации теплоэлектростанций южной периферии криолитозоны Забайкалья // Сергеевские чтения. Вып. 5 / Под ред. В.И. Осипова. М.: ГЕОС, 2003. С. 430–434.
 21. Шестернев Д.Д., Верхотуров А.Г. Влияние природных условий территории на подтопление искусственных покрытий аэропорта г. Чита // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27. № 1. С. 24–33.

ASSESSMENT OF THE CURRENT ECOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL STATE AND FORECAST OF ITS CHANGES IN THE CHITA TPP-1 ASH DUMP TERRITORY (EASTERN TRANSBAIKALIA)

I. A. Fedorov^{a,#} and L. I. Usmanova^{a,##}

^a*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Nedorezova 16a, Chita, 672014, Russia*

[#]*E-mail: fedorowia@gmail.com*

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

The article provides an assessment of the current state of groundwater and shows the dynamics of its transformation based on the analysis of geoenvironment monitoring results for 2008–2022. The geological environment monitoring program included hydrodynamic and hydrogeochemical observations on the Chita thermal power plant № 1 ash dump territory placed in the west of the city. Regime observations were carried out over the aquifer of the Lower Cretaceous sediments of the Doronin formation using hydrogeology boreholes. The hydrodynamic data correlation analysis indicates the relationship of groundwater levels in boreholes located at a considerable distance from the ash dump with the water level in the nearest borehole. The expansion of technogenic object influence zone in the southwest direction is confirmed by this circumstance, together with the appearance of an ascending spring and the previous studies results of the filtration properties of soils which lie at the ash dump bowl base. As revealed earlier, the ash dump appeared to be the source of significant contamination of groundwater in this area. Nowadays, the polluted area is estimated approximately at 12 km². The concentrations of sulfates, boron, total dissolved solids, as well as total hardness exceed the norms for drinking water within the area of about 12 km² in the boreholes on the filtration flow route in the southeast direction from the ash dump. The chemical composition of water taken from boreholes in the southwest direction is currently close to the background values of the water quality indices for the Chita-Ingoda intermountain artesian basin. Meanwhile, the composition of the spring located 1 km southwest from the third ash dump bowl indicates worsening of groundwater quality. As proceeds from the study performed, the operation of the third ash dump bowl will create conditions for the spread of the groundwater contamination front in a new direction with flooding of previously unaffected areas.

Keywords: *ash dump, groundwater, observation boreholes, water level, hydrodynamic regime, hydrochemical indices, contamination, flooding*

REFERENCES

1. Babello, V.A., Belyakov, A.E. [To the question of reliability of shielding an ash dump bed]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*, 2005, no. 8 (560), pp. 93–97. (in Russian)
2. Bogomolov, N.S., Orlova, L.M., Gerakov, N.N., et al. [Hydrogeology of the USSR. Chita region]. Moscow, Nedra Publ., 1969, vol. XXI, 444 p. (in Russian)
3. Verkhoturov, A.G., Tsyganok, V.I., Karpov, V.V., et al. [Hydrogeology of the TransBaikal Territory]. Chita, Zabaykal'skiy Gos. Univ., 2017, 240 p. (in Russian)
4. [State Standard 27384–2002. Water. Standards of measurement error of composition and property indices]. Moscow, Standartinform Publ., 2010, 6 p.
5. [State Standard 31861–2012. Water. General sampling requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 32 p.
6. Delitsyn, L.M., Ezhova, N.N., Vlasov, A.S., Sudareva, S.V. [Ash dumps of solid fuel thermal power plants as a threat to environmental safety]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2012, no. 4, pp. 15–26. (in Russian)
7. Zamana, L.V., Usmanov, M.T., Borzenko, S.V., et al. [Hydrogeological conditions and the sources of the Chita airport “Kadala” airfield flooding]. Proc. XXIII All-Russia symposium on underground hydrosphere. Irkutsk, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 2021, pp. 466–470. (in Russian)
8. Zamana, L.V., Askarov, Sh.A., Usmanova, L.I., et al. [Pollution of ground and surface water in the influence zone of filtration leakage from the hydraulic ash disposal site at the Chita TPP-1]. Proc. XX Intern. Symp. “Kulagin Readings: Technique and Technology of Production Processes”. Chita, TransBaikal State University, 2020, pp. 78–82. (in Russian)
9. Kondrat'ev, V.G. [Experience in pre-project scientific studies of options for locating new sites during the reconstruction of the ash dump at Chita TPP-1]. Proc. All-Russia Symposium “Ecology of reservoirs as coolers of power stations”. Chita, 2017, pp. 153–157. (in Russian)
10. Mironov, A.V. Experimental biological reclamation of ash and slag material at Chita TPP-1. *Prirodoobustroistvo*, 2019, no. 4, pp. 29–33. (in Russian)
11. Olenchenko, V.V., Usmanov, M.T., Usmanova, L.I., Tsyrenzhapov, S.V. [Identification of technogenic water migration routes from hydraulic structures using the method of electrical tomography (by the example of an ash dump at the Chita TPP-1)]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2017, no. 1-1, pp. 101–105. (in Russian)
12. [P 78-2000. Recommendations for monitoring the groundwater state in the area of TPP ash dumps]. St. Petersburg, VNIIG Publ., 2000, 28 p. (in Russian)
13. Pechnikov, M.A., Grachev, A.V., D'yachkov, A.A., Baktukhtin, A.G. [General characteristics of Chita TPP-1. In.: [Innovative technologies in technology and education]. Romanova, L.S. Ed., Chita, 2016, pp. 62–66. (in Russian)]
14. [RD 153-34.1-21.325-98. Methodical instructions for monitoring the groundwater regime at thermal power plants under construction and in operation]. Moscow, ORGRES Publ., 1999, 36 p. (in Russian)
15. [SaNPIN 1.2.3685-21. Sanitary rules and regulations. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. Moscow, 2021, 469 p. (in Russian)
16. Sungatullin, R.Kh., Khaziev, M.I. [Groundwater and energy complexes (by the example of Kazan TPP-1)]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Estestvennye nauki*, 2013, vol. 155, no. 1, pp. 101–122. (in Russian)
17. Fomin, G.S. [Water. Control of chemical, bacterial and radiation safety according to international standards]. Moscow, Protektor Publ., 2010, 1008 p. (in Russian)
18. Tselyuk, D.I. [Features of the technogenic impact of ash dumps in Central Siberia on groundwater]. Cand. Sci. (Geol.-Min.) diss., Krasnoyarsk, 2009. 162 p. (in Russian)
19. Shesternev, D.M., Lapkin, G.I. [Geoecological problems of reconstruction of thermal power plants in the unified energy system of Siberia and ways to solve them (by the example of TPP-1, Chita)]. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, no 1 (52), pp. 156–160. (in Russian)
20. Shesternev, D.M., Lapkin, G.I., Tataurov, S.B., Byankin, S.N. [Geoecological problems of operation of thermal power plants in the southern periphery of the permafrost zone of Transbaikalia]. Proc. XIII All-Russia Conference “Sergeev Readings”. Moscow, GEOS Publ., 2003, no. 5, pp. 430–434. (in Russian)
21. Shesternev, D.D., Verkhoturov, A.G. [Influence of natural conditions of the territory on flooding of artificial coverings at the Chita airport]. *Vestnik Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 24–33. (in Russian)

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 628.4

ОСТАТКИ ОТ СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ: СОСТАВ, ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ, ОБРАБОТКА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

© 2023 г. Т. И. Юганова^{1,*}, В. С. Путилина^{1,**}¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: tigryu@gmail.com

**E-mail: vputilina@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

После доработки 12.05.2023 г.

Принята к публикации 16.05.2023 г.

Сжигание – распространенный метод обработки твердых коммунальных отходов, позволяющий уменьшить их массу на 70% и объем до 90%. При этом большинство негорючих компонентов впоследствии концентрируется в относительно небольшом количестве остатков сжигания (ОСТКО) – шлаке и летучей золе, которые необходимо обрабатывать дополнительно и/или захоранивать на полигоне отходов. В статье описываются образование и состав ОСТКО, вопросы рециклинга и экологического регулирования, выщелачивание загрязняющих веществ и проблемы его тестирования, способы обработки ОСТКО для уменьшения воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, ТКО, остатки сжигания ТКО, шлак, летучая зола, тяжелые металлы, рециклинг, выщелачивание, тестирование выщелачивания, обработка остатков сжигания ТКО

DOI: 10.31857/S0869780923040094, EDN: XWBAFR

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно в мире образуются тысячи миллионов тонн твердых коммунальных отходов (ТКО, MSW). Стратегии обращения с отходами и их захоронения вызывают серьезную озабоченность во многих странах. Сжигание ТКО (СТКО, MSWI) – распространенный метод обработки отходов, так как он позволяет уменьшить их массу на 70% и объем до 90%, а также обеспечивает регенерацию энергии из отходов. В большинстве развитых стран с ограниченной территорией и жестким экологическим контролем экологическая политика, как правило, максимально сокращает количество захоронений на полигонах. Так, в Японии сжигается около 80% ТКО. Напротив, в Китае более 80% ТКО попадает на полигоны [14]. В России в настоящее время распространяется сооружение мусоросжигательных заводов (МСЗ), но способы обработки и трансформация твердых остатков сжигания (ОСТКО) в окружающей среде недостаточно изучены. Поэтому целесообразно обратиться к зарубежному опыту.

Хотя само сжигание считается гигиеничным способом обработки, большинство негорючих компонентов впоследствии концентрируется в относительно небольшом количестве ОСТКО, которые необходимо обрабатывать дополнитель-

но. Производятся два основных типа ОСТКО [11]: донная зола (bottom ash, BA) со шлаком (далее вместе “шлак”¹) и летучая зола (ЛЗ, fly ash, FA). Массовое отношение шлака и ЛЗ обычно составляет от 4 : 1 до 5 : 1 [18], по другим данным около 10 : 1 – примерно 20 и 2 мас. % поступающих отходов соответственно [28]. Например, в Дании ежегодно производится около 600 000 т шлака и 90 000 т ЛЗ из примерно 3 000 000 т сжигаемых ТКО: итого ОСТКО составляют 23 мас. %. ЛЗ обычно составляет около 2–6% от исходной массы сжигаемых отходов [11].

Шлак значительно обогащен токсичными микроэлементами по сравнению с исходным материалом отходов [4], но после специальной обработки обычно захоранивается на полигонах либо используется, например, в качестве вторичного сырья в строительстве. ЛЗ содержит токсичные вещества в больших количествах, чем шлак. Такие тяжелые металлы (ТМ), как Cd и Pb могут легко вымываться из ЛЗ и загрязнять почву и подземные воды, создавая высокую опасность для

¹ В технологическом процессе сжигания донная зола обычно перемешивается со шлаком – несгоревшим остатком ТКО, и не выделяется в отдельную категорию при классификации твердых остатков МСЗ.

окружающей среды и здоровья человека [16]. Поэтому ЛЗ подлежит постоянному хранению на полигонах опасных отходов либо специальной обработке с последующим захоронением с менее строгими требованиями или использованием, например для производства стекла и керамики [23].

Основной проблемой при захоронении и переработке ОСТКО является выщелачивание опасных компонентов, таких как ТМ и токсичные органические соединения (например, диоксины и фураны). Перед использованием и/или захоронением ОСТКО требуется *количественная оценка выщелачивания*, в частности ТМ [18], которая может также рассматриваться как важная часть широко применяемой за рубежом процедуры оценки воздействия жизненного цикла (ОВЖЦ, LCIA) различных сценариев обращения с отходами [1]. Для правильной оценки этих сценариев необходимо знать об эмиссиях загрязнителей (например, о выщелачивании из шлака, используемого в дорожном строительстве, и/или о выщелачивании из захороненной ЛЗ) [11].

Помимо экологических факторов количественная оценка выщелачивания может включать определенную экономическую составляющую, в частности, в отношении ЛЗ. Как опасные отходы она часто вывозится на специальные полигоны, что требует значительных затрат. Если можно доказать на основе надежных экспериментов и/или моделирования, что состав фильтрата ОСТКО с течением времени будет соответствовать установленным законодательством нормативным ограничениям, то категория опасности материалов может быть изменена с “опасных” на “неопасные” или даже “инертные”. Это, в свою очередь, окажет значительное влияние на стоимость обработки и захоронения ОСТКО [11].

На процесс выщелачивания *в природных условиях* влияет ряд факторов, включая pH, отношение жидкой и твердых фаз (L/S), свойства ОСТКО, их выветривание и выдерживание (в отвалах, на полигонах отходов); а *в экспериментах* – методы выщелачивания, продолжительность контакта и масштаб исследования. Для оценки выщелачивания ОСТКО используются статические серийные тесты и динамические тесты с колонкой. Тесты выщелачивания из колонки предоставляют более надежную информацию, поскольку данные на основе инфильтрации получаются по схеме потока, близкой к природным условиям [18].

Следует отметить, что выщелачивание необходимо количественно оценивать как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе. Краткий срок может означать срок службы дороги или полигона (т.е. <100 лет), тогда как долгий срок может означать “навсегда” (на столетия). Полномасштабные данные о длительном выщелачивании ОСТКО в натуральных условиях отсутствуют. Поэтому количественно выщелачивание обычно определяется с помощью лабораторных экспери-

ментов. Они являются лишь грубым приближением полномасштабных процессов, для завершения которых могут потребоваться десятилетия и столетия. Условия выщелачивания во время лабораторных экспериментов не обязательно отражают условия полномасштабных сценариев (например, равновесие). Таким образом, наблюдаемые уровни концентрации загрязняющих веществ (ЗВ), полученные в результате лабораторных экспериментов по выщелачиванию, могут не соответствовать тем, которые наблюдались бы при полномасштабном сценарии выщелачивания тех же материалов. Поэтому при использовании лабораторных данных в качестве исходных для геохимического моделирования полномасштабных сценариев необходим тщательный анализ, поскольку несоответствия между лабораторными и полномасштабными данными могут существенно повлиять на прогнозы выщелачивания [11].

В статье на основе анализа зарубежной литературы рассматриваются образование и состав ОСТКО, анализируются важнейшие проблемы обращения с ОСТКО и оценки выщелачивания, относящиеся как к шлаку, так и к ЛЗ: методы оценки токсичности, вопросы тестирования выщелачивания загрязняющих веществ и геохимического моделирования, способы обработки ОСТКО для уменьшения воздействия на окружающую среду.

ОБРАЗОВАНИЕ, ВИДЫ И СОСТАВ ОСТАТКОВ СЖИГАНИЯ ТКО (ОСТКО)

На МСЗ ТКО постоянно подаются в печь на сжигание. В ходе процесса должно поступать достаточное количество воздуха для обеспечения полного сгорания отходов и предотвращения образования диоксинов и оксида углерода. Вырабатываемое избыточное тепло также можно использовать для других целей, например, для обогрева бассейнов [14].

Образуются несколько потоков ОСТКО, как в процессе собственно сжигания, так и в результате последующей очистки дымовых газов. Первая часть включает донную золу и отсеб с колосниковой решетки, которые обычно собираются вместе как *шлак*. Вторая часть, *летучая зола*, включает золу бойлера; золу зоны рекуперации² энергии; золу, собранную в электростатическом пылеулавливателе; остатки скруббера³ и др. Эти отдельные потоки впоследствии часто смешиваются в зависимости от вариантов дальнейшей обработки и/или действующего законодательства [11].

Серьезной проблемой сжигания отходов является загрязнение воздуха. Для его минимизации и обеспечения его соответствия экологическим

² Рекуперация – возвращение части расходуемой энергии для повторного использования в том же процессе.

³ Скруббер – устройство для очистки дымового газа.

Таблица 1. Макро-, микро- и следовые элементы и примеры основных фаз в шлаке и ЛЗ на основе классификации IAWG [16, 20]

Шлак			
Матричные макроэлементы	Матричные микроэлементы	Другие микроэлементы	Другие следовые элементы: а – оксианионные элементы, б – металлы, в – неметаллы
>10000 мг/кг	1000–10000 мг/кг	1000–10000 мг/кг	<1000 мг/кг
O, Si, Fe, Ca, Al, Na, K, C	Mg, Ti, S, P, Cl, Mn, Ba	Zn, Cu, Pb, Cr	(а) Sn, Sb, V, Mo, As, Se (б) Sr, Ni, Co, Cd, Ag, Hg (в) B, Br, F, I
Главные фазы: SiO ₂ , Fe ₃ O ₄ , Fe ₂ O ₃ , KAlSi ₃ O ₈ , NaAlSi ₃ O ₈ , CaAl ₂ Si ₂ O ₈ , CaMgSi ₂ O ₇ , CaO, CaCO ₃ , CaSO ₄ , Ca ₃ (PO ₄) ₂ , NaCl, KCl			
ЛЗ			
Макроэлементы	Микроэлементы	Следовые элементы	
>10000 мг/кг	1000–10000 мг/кг	<1000 мг/кг	
O, Cl, Ca, Si, Mg, Fe, Al, K, Zn, S, Pb	Ti, Mn, Ba, Sn, Cu	Hg, Cd, Sb, Cr, Sr, Ni, As, V, Ag, Co, Mo, Se	
Главные фазы: K ₂ ZnCl ₄ , KCl, NaCl, CaSO ₄ , PbSO ₄ , KAlSi ₃ O ₈ , CaAl ₂ Si ₂ O ₈			

стандартам на современных МСЗ предназначена система очистки дымовых газов. Сухой/мокрый скруббер используется для распыления мелкодисперсной суспензии или известкового порошка в горячие дымовые газы с целью нейтрализации кислых газов, таких как оксиды серы и хлористый водород [14]. Сорбенты из гашеной извести и активированный уголь применяются для удаления кислых газов (в основном HCl, HF и SO₂), улавливания летучих ТМ и стойких органических микрозагрязнителей (СОМЗ) [22]. Система селективного некаталитического восстановления используется для удаления оксидов азота путем добавления мочевины или аммиака с выделением азота, диоксида углерода и воды. Рукважный фильтр отделяет и удаляет мелкие частицы и частицы пыли [14]. Таким образом, ОСТКО образуются как из сжигаемых ТКО, так и из различных химических добавок, используемых на МСЗ [16].

Количество опасных химических соединений в полученном от СТКО шлаке намного ниже, чем в ЛЗ, поэтому шлак, как правило, не включается в категорию опасных отходов. Однако ЛЗ обычно классифицируется как опасные отходы из-за присутствия токсичных ТМ и диоксинов [15].

В нескольких исследованиях были получены или собраны данные о химическом составе шлака и ЛЗ [16]. Основными элементами являются Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, S, P и Cl, которые содержатся в ОСТКО в виде оксидов, силикатов, фосфатов, хлоридов и сульфатов. Важными элементами являются As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb и Zn из-за их токсичности. В ОСТКО обычно присутствуют

следовые количества высокотоксичных органических соединений. Эти СОМЗ представляют собой полициклические углеводороды (ПАУ), хлорбензолы (ХБ), полихлорированные бифенилы (ПХБ) и полихлорированные дибензо-*n*-диоксины (ПХДД) и фураны (ПХДФ).

Международная рабочая группа по золе (IAWG) разделила элементы в шлаке и ЛЗ на три различные категории в зависимости от содержания элементов: макроэлементы (>10000 мг/кг), микроэлементы (1000–10000 мг/кг) и следовые элементы (<1000 мг/кг) [20]. В табл. 1 показаны эти категории и типичные неорганические фазы, определенные IAWG.

Si, Fe, Ca и Al – обычно наиболее распространенные элементы в шлаке (не считая O и C), тогда как в ЛЗ наиболее распространены Cl, Ca, Si, K и Na. Часть кальция может происходить из добавок или сорбентов на основе извести, а не из сжигаемых ТКО. Металлы на МСЗ переносятся вместе с дымовыми газами и обогащаются в минеральных агрегатах (кварц, полевой шпат, волластонит, стекло) или испаряются и конденсируются в виде хлоридов или сульфатов [28].

В табл. 2 приведены диапазоны содержания элементов и СОМЗ в шлаке и ЛЗ [23]. Репрезентативные аналитические данные о содержании в твердых образцах ОСТКО для обычных неорганических параметров (включая ТМ) и диоксинов приведены в [26].

Таблица 2. Диапазоны химического состава шлака и ЛЗ от СТКО [23]

Элемент	Единица	Шлак		ЛЗ	
		min	max	min	max
Al	г/кг	21.9	72.8	6.4	93
Ca	—“—	0.37	123	46	361
Cl	—“—	0.8	4.19	45	380
Fe	—“—	4.12	150	0.76	71
K	—“—	0.75	16	17	109
Mg	—“—	0.4	26	1.1	19
Mn	—“—	0.083	2.4	0.2	1.7
Na	—“—	2.87	42	6.2	84
P	—“—	1.4	6.4	1.7	9.6
S	—“—	1	5	1.4	32
Si	—“—	91	308	36	190
Ti	—“—	2.6	9.5	0.7	12
Ag	мг/кг	0.28	36.9	0.9	192
As	—“—	0.12	189	18	960
Ba	—“—	400	3000	34	14000
Cd	—“—	0.3	70.5	16	1660
Co	—“—	6	350	1.9	300
Cr	—“—	23	3170	72	570
Cu	—“—	190	8240	16	2220
Hg	—“—	0.02	7.75	0.1	51
Mo	—“—	2.5	276	9.3	49
Ni	—“—	7	4280	19	710
Pb	—“—	98	13700	254	27000
Se	—“—	0.05	10	0.7	31
Sn	—“—	2	380	367	5900
Sr	—“—	85	1000	<80	500
V	—“—	20	122	4	150
Zn	—“—	613	7770	4308	41000
ПАУ	мкг/кг	н.д.*	н.д.	18	5600
ХБ	—“—	—“—	—“—	0.03	890
ПХБ	—“—	—“—	—“—	<40	
ПХДД	—“—	—“—	—“—	0.7	1000
ПХДФ	—“—	—“—	—“—	1.4	370
ТХДД	экв	—“—	—“—	0.8	2.5
ООУ**	г/кг	—“—	—“—	4.9	17
LOI***	—“—	—“—	—“—	11	120

* н.д. — недоступно,

** ООУ — общий органический углерод,

*** LOI — потеря при прокаливании.

РЕЦИКЛИНГ ОСТКО И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Политика по обращению с ОСТКО

Многочисленные исследования продемонстрировали техническую осуществимость и эко-

номические преимущества различных технологий рециклинга ОСТКО, т.е. их использования в качестве вторичного сырья. Однако поддерживающая политика в разных странах играет важную роль во внедрении этих технологий в отрасли обработки золы [29]. Сравнительный анализ [17] по-

казал, что влияние национальной политики по переработке ОСТКО в основном обусловлено большой общей численностью населения (Китай) или высокой плотностью населения при ограниченной доступности земли (Япония, Южная Корея, Сингапур, Тайвань). В Европейском союзе (ЕС) первостепенное значение имеет экологическое регулирование, которое направлено на минимизацию образования отходов и максимальное использование отходов в качестве вторичных ресурсов. Установлены критерии приемлемости отходов для включения ОСТКО в строительные работы, но их принятие в государствах-членах ЕС зависит от различных факторов. Обычно это история национальных правил обращения с отходами, экономические последствия и соответствующие воздействия на окружающую среду. В частности, учитывается значимость подземных вод (чувствительных к неправильному обращению с ОСТКО) как источника питьевой воды.

Тайвань – первая азиатская страна, разработавшая стратегию обращения и повторного использования ресурсов, основанную на широком использовании шлака от СТКО в строительстве. С другой стороны, Китай, крупнейший производитель ТКО в мире, не имеет соответствующей политики в отношении рециклинга ОСТКО [29]. Вместо этого там предпочли сжигание захоронению необработанных отходов. Образующиеся *шлаки* от СТКО отправляются для захоронения непосредственно на полигоны (согласно Стандарту Китая по управлению загрязнением на полигоне ТКО). Кроме того, шлаки от СТКО перерабатываются в цементных печах (в соответствии со Стандартом Китая по управлению загрязнением при совместной переработке твердых отходов в цементных печах) при условии, что доказана более низкая выщелачиваемость ТМ. ЛЗ от СТКО относится к опасным отходам, а захоронение и обработка в цементных печах разрешены, если выполняются особые нормативные требования. Тем не менее отсутствие надзора и нормативного правоприменения вызвало запрет рециклинга, что привело к увеличению в Китае содержания ТМ в наземной среде, окружающей МСЗ. Очевидно, что ЛЗ СТКО может стать еще одним значительным источником загрязнения ТМ. Чтобы предотвратить это, нужны регулирующие меры и усиленный надзор. Кроме того, от правительства требуются финансовые стимулы для поддержки разработки технологий рециклинга ЛЗ от СТКО.

Несмотря на широкое распространение СТКО в США, рециклинг образовавшейся золы (в 2010 г. 6,6 млн т) практически не осуществляется. Это объясняется отсутствием политической основы для поддержки такой инициативы. Общественность обеспокоена потенциальными последствиями и отсутствием официально установленного контроля над переработкой и повторным исполь-

зованием ОСТКО при строительстве дорожных покрытий. Кроме того, растет озабоченность по поводу загрязнения окружающей среды и воздействия ОСТКО на здоровье населения, что препятствует усилиям по рециклингу отходов [29].

Оценка токсичности ОСТКО

До сих пор остается неясным, какой тест токсичности следует включить в правила для оценки воздействия ОСТКО на окружающую среду [18]. Простой и быстрый подход – проанализировать компоненты выщелачивания ОСТКО и сравнить их с существующими данными о токсичности или стандартами. Однако этот метод имеет тенденцию либо переоценивать опасность, вызванную отдельным элементом, либо недооценивать синергетический и антагонистические эффекты, вызываемые сосуществующими компонентами. Кроме того, в некоторых случаях концентрации токсичных веществ ниже пределов обнаружения. Поэтому все больший интерес вызывают экотоксикологические тесты с использованием биотестов. В ходе тестирования исследователи отмечали более высокую токсичность частиц ОСТКО с малым размером (<0.125 м) по сравнению с частицами размера <1 и 4 м, что было приписано более высокому количеству высвобождаемых ТМ при выщелачивании частиц золы СТКО с меньшим размером. В других исследованиях было оценено токсическое влияние твердых ОСТКО на некоторые живые организмы: белый клевер, водоросли, водяных блох, веслоногих рачков, рыб. Но тесты экотоксичности на основе биоаккумуляции в отдельном организме и трофического переноса микроэлементов между видами не позволяют оценить токсический эффект для высших видов и человека, вызываемый исключительно ОСТКО и их фильтратом. Тем не менее существующие экотоксикологические тесты показывают, что ОСТКО могут представлять опасность для окружающей среды. Необходимы дальнейшее изучение и разработка соответствующих методов для изучения выщелачивания в долгосрочной перспективе, экотоксикологии, оценки риска для здоровья и биоаккумуляции [18].

ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ОСТКО

Методы тестирования, виды тестов

В ЕС для оценки поведения материала при выщелачивании используются различные стандартизированные методы тестирования [2]. Стандарт ЕС в различных странах обычно преобразуется в национальную версию. Тесты различаются по испытательной установке, отношению L/S, размеру частиц тестируемого материала и продолжительности тестирования. Установка может реализо-

вать *серийный тест*⁴, *инфильтрационный тест*⁵ или *тест для связанных применений*⁶. Из-за общей сложности процесса выщелачивания признано, что какой-либо один тип тестов не может дать адекватного описания процессов, регулирующих высвобождение ЗВ, поскольку происходят различные комбинации таких процессов [11]. Поэтому чтобы получить лучшую оценку поведения материала при выщелачивании в конкретном сценарии, следует использовать комбинацию различных типов тестов.

В частности, *серийные тесты зависимости от рН* в сочетании с тестами с инфильтрационной колонкой признаны наиболее важными, поскольку они предоставляют соответствующую информацию о поведении материала при изменении условий выщелачивания и о химическом составе фильтрата [3]. Действительно, результаты тестов зависимости от рН широко используются в геохимическом моделировании для идентификации и, возможно, количественной оценки химических фаз (минералов и сорбционных фаз), выделяющих ЗВ. Эти тесты можно рассматривать как инструмент для определения характеристик материала, поскольку большинство процессов выщелачивания сильно зависит от рН. Тестирование материала в четко определенных условиях при изменении только рН позволяет определить преобладающие процессы выщелачивания на разных стадиях (ожидается, что значение рН выщелачиваемого материала будет меняться со временем) [11].

Эксперименты с *серийным выщелачиванием без постоянного регулирования рН* в основном используются в качестве теста на соответствие нормативам. Так, серийные тесты при L/S 2 л/кг в настоящее время используются для классификации материалов перед захоронением. Результатом такого теста является одно значение (для каждого элемента), которое предположительно отражает совокупное выщелачивание для наихудшего варианта во время начальной стадии полномас-

⁴ В серийном тесте тестируемый материал и раствор находятся в бутылки с фиксированным отношением L/S, вращающейся в течение определенного времени. Для этого типа тестов в ЕС принят стандарт EN 12457, части 1–4 [6–9]. Различие между частями стандарта заключается в количестве шагов выщелачивания (1 или 2), отношении L/S (2, 8 и 10 л/кг) и/или размере частиц исследуемого материала (<10 или <4 мм).

⁵ В инфильтрационном тесте испытуемый материал помещается в колонку, а выщелачивающий раствор протекает через нее снизу вверх. В зависимости от отношения L/S фильтрат собирается через определенные промежутки времени. Отношение L/S варьирует от 0.1 до 10 л/кг или от 1 до 10 л/кг.

⁶ Тест NEN 7375:2004 [21], используется в Нидерландах, например, при применении шлака в качестве заполнителя в бетоне. Монолит, содержащий тестируемый материал, помещается в воду на длительный период, и измеряется концентрация элементов, ставших подвижными (из-за диффузии). В этом тесте важна площадь соприкосновения жидкости и поверхности монолита, а не отношение L/S.

штабного сценария, т.е. при “естественном” рН материала (естественный рН – это исходное значение рН материала без добавления кислоты или основания в раствор). Тем не менее для прогнозирования длительного выщелачивания важно понимать различия между экспериментами по серийному выщелачиванию и по инфильтрации, а результаты серийных экспериментов следует использовать критически [11].

Тесты с *инфильтрационной колонкой* специально применяются для оценки эволюции процесса выщелачивания в зависимости от отношения L/S, т.е. количества воды, контактирующей с отходами. Несмотря на то что эти тесты более сложны и требуют много времени по сравнению с простыми серийными тестами, они считаются более надежными для оценки выделения ЗВ из отходов, поскольку ожидается, что они лучше отражают процессы выщелачивания, которые могут происходить в естественных условиях [3].

Однако выщелачиваемость компонентов из отходов, прогнозируемая с помощью лабораторных тестов, все же может значительно отличаться от выделения из твердой фазы в природных условиях [3]. *Натурные и полномасштабные тесты*, например, в реакторах-имитаторах полигонов отходов [13], позволяют лучше прогнозировать качество фильтрата в долгосрочной перспективе, чем лабораторные статические тесты.

Выщелачивание можно охарактеризовать как “растворение твердого материала при контакте с водой”. Хотя это действительно может показаться примитивным, это вряд ли верно. Фактически выщелачивание следует воспринимать как многомерный процесс. Морфология частиц, кинетика, химический состав, рН, неорганическое/органическое комплексобразование, доступная для выщелачивания фракция являются основными факторами, которые необходимо описать для достижения конечной цели – описания выщелачивания в зависимости от времени. Для этого требуется большой объем данных, желателен полный масштабных. Однако для множества полномасштабных сценариев данные о выщелачивании либо скудны, либо вообще отсутствуют. Поэтому лабораторные эксперименты по выщелачиванию являются ценным инструментом для получения такой информации [11].

Процессы выщелачивания и удерживания элементов

На основе исследований с различными ОСТКО были определены три основных типа процессов выщелачивания и удерживания, и соответственно элементы тоже были разделены на три группы [11, 18].

I. Элементы, выщелачивание которых происходит из хорошо растворимых доступных минералов (например, Na, K). Высокая растворимость таких минералов, присутствующих в ОСТКО (например, NaCl), способствует быстрому выщелачива-

нию металлов. Другими словами, поскольку минерал легко растворяется, ограничивающим фактором является его доступность. Соответственно, разные значения pH обуславливают лишь незначительные различия в концентрациях металлов в растворах. В тестах с колонкой выщелачивание этого типа характеризуется довольно высокими исходными концентрациями (от десятков до сотен граммов в литре) с последующим довольно быстрым снижением по мере истощения.

II. Элементы, которые выщелачиваются из минеральных фаз: оксидов, карбонатов и сульфатов (например, Ca, S, Si, Al, Ba, Zn). Выщелачивание многих металлов обусловлено растворением обычных минералов. Это связано с растворением оксидов металлов, присутствующих в твердом веществе ОСТКО, таких как (гидр)оксиды алюминия и железа и оксид цинка, или осаждением этих оксидов, а также карбонатов и сульфатов. Растворение минеральных фаз происходит в том случае, когда при контакте с твердым веществом раствор насыщается относительно рассматриваемого элемента [18]. Выщелачивание при этом ограничено растворимостью минералов. Поэтому в pH-статическом тесте могут наблюдаться как отсутствие выщелачивания, так и большие различия в пределах диапазона pH. Первое происходит в случае единственного “контролирующего” минерала, на растворимость которого не влияют изменения pH, например гипс. Последнее можно увидеть в случае многих металлов, проявляющих *амфотерное поведение*, – интенсивное выщелачивание, как при высоком, так и при низком pH с минимумом при нейтральном pH [11].

В тестах с колонкой выщелачивание элементов группы II характеризуется довольно стабильными концентрациями в растворе в течение длительных периодов времени, поскольку pH не изменяется. Растворение одного минерала и его замена другим может привести к изменению концентрации в растворе [11].

III. Элементы, выщелачивание и удержание которых определяют процессы сорбции/комплексобразования (например, Cd, Cu, Pb, Ni). Этот тип выщелачивания характерен для многих металлов. Как правило, при высоких значениях pH, наблюдаемых в фильтрах из ОСТКО, катионы этих металлов имеют тенденцию сорбироваться на отрицательно заряженных реактивных поверхностях, таких как водные (гидр)оксиды трехвалентного железа (НФО) и алюминия (АЮ). Концентрация этих металлов в растворе снижается с увеличением площади реагирующих поверхностей [11]. Подобные механизмы выщелачивания возможны для As, Se и Ag. Поведение Cr, Cu, Zn и Pb в фильтрате тоже может определяться сорбцией, либо осаждением. В частности, было показано, что выщелачивание Cr могло происходить из минералов BaCrO₄, а Pb в фильтрате в основном присутствовал в виде соединений с сульфатом и

фосфатом. На основании результатов тестов выщелачивания был сделан вывод, что Cu и Zn в ЛЗ связываются с Ca-содержащими соединениями посредством осаждения и сорбции, а это приводит к снижению их концентрации в фильтрате. Понимание этих механизмов является ключевым шагом для прогнозирования высвобождения микроэлементов и количественной оценки потенциальных рисков при использовании и захоронении ОСТКО [18].

Комплексообразование металлов с растворенным органическим углеродом (РОУ) хорошо известно, при этом выщелачивание многих металлов пропорционально количеству РОУ [11].

Сорбция на НФО/АЮ – не единственный процесс, посредством которого металл может удерживаться в твердой фазе. Например, значительные количества многих металлов в ОСТКО могут перейти в неподвижное состояние во время образования гидратированных фаз цемента, таких как этtringит (3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O), и, таким образом, их концентрация в фильтрате будет определяться растворимостью.

Кроме того, механизм выщелачивания элемента может меняться во времени. Поэтому для получения желаемой информации можно использовать несколько типов тестов выщелачивания. Однако важно понимать, какие условия выщелачивания рассматриваются. Например, существуют значительные различия в выщелачивании при сравнении инфильтрации через гранулированный материал с проточным типом инфильтрации для монолитных материалов. Следовательно, тип теста выщелачивания должен точно соответствовать изучаемому сценарию обращения с ОСТКО.

Было сделано предположение, что для оценки полномасштабного выщелачивания элементов из групп I и II могут быть использованы результаты лабораторных экспериментов с колонками. Однако во избежание значительных недооценок при изучении выщелачивания элементов из группы III необходимо описать зависящую от времени миграцию РОУ в тестируемой системе или минимизировать физическое неравновесие во время лабораторных экспериментов (например, использовать большую колонку, меньшую скорость потока) [11].

Отношение жидкой и твердой фаз при выщелачивании

Важный параметр в отношении всех тестов выщелачивания – *отношение жидкой и твердой фаз (L/S)*. Его можно определить как отношение объема жидкости (л) к контактирующей с ним сухой массе твердого вещества (кг). Следовательно, умножение измеренных концентраций раствора (мг/л) на отношение L/S данного теста (л/кг) позволяет выразить результаты различных тестов выщелачивания как “*высвобожденную массу*” (мг/кг). Поэтому данные по выщелачиванию для

различных материалов можно впоследствии сравнивать. Кроме того, при условии знания скорости инфильтрации (например, атмосферных осадков) любое заданное отношение L/S можно в идеале пересчитать на продолжительность выщелачивания [11].

Отношение L/S – критический фактор, влияющий на выщелачивание ТМ из ОСТКО, которое в первую очередь обусловлено растворимостью минералов (группа II). Более высокое отношение L/S способствует их растворению и ускоряет выделение ТМ. Для прогнозирования концентраций ТМ в экспериментах с колонками и в серии в зависимости от L/S были разработаны математические модели, и результаты показали, что при низком отношении L/S подвижность металлов была слабой. Влияние отношения L/S на выщелачивание также зависит от элемента. Например, на выщелачивание некоторых ТМ, таких как Pb, Sb, Zn и V, в основном влияет отношение L/S: высокое значение приводит к более высокому совокупному их выделению. Напротив, на поведение As, Cd, Cu, Ni и Se в основном влияет процедура выщелачивания, например, выбор теста с колонкой или серийного теста [18].

Механизм выщелачивания в зависимости от pH

Общеизвестно, что pH – один из наиболее важных факторов, влияющий на выщелачивание и неорганических, и органических компонентов из твердой фазы в раствор. Значение pH свежих ОСТКО часто бывает высоким (~10–12), что может быть связано с образованием в результате реакции гидратации щелочного гидроксида кальция – Ca(OH)₂. Растворимость ТМ сильно зависит от pH, однако степень чувствительности различается для разных металлов. Большинство из них (например, Cd, Cu, Pb и Zn) следуют катионному выщелачиванию, т.е. концентрации элементов снижаются с увеличением pH раствора. Для сравнения, максимальное выщелачивание As наблюдается в сильноокислых (pH ~2) и сильнощелочных (pH ~12) условиях и относится к амфотерному типу выщелачивания. Se проявляет оксианионный характер выщелачивания, и самые высокие концентрации достигаются в сильнощелочных условиях (pH >11) [18].

Размещение на полигоне отходов может снизить pH шлака с 12 до 8, и, таким образом, выщелачивание замедляется. Выщелачивание ТМ из выветрелого шлака предположительно зависит от сорбционной способности вновь образовавшихся (гидр)оксидов Fe и Al для металлов. Однако на выщелачивание из ЛЗ пребывание на полигоне не оказывает значительного влияния [31].

Геохимическое моделирование выщелачивания металлов из ОСТКО

При изучении выщелачивания существует несколько проблем. Во-первых, инфильтрацион-

ные эксперименты очень чувствительны в отношении кинетики. Очевидно, что инфильтрация в лабораторных экспериментах происходит намного быстрее, чем в полномасштабном сценарии. Во-вторых, данные о длительной инфильтрации немногочисленны. В лабораторных экспериментах по изучению инфильтрации конечной точкой обычно является отношение L/S 10 л/кг. Такие данные не подходят для долгосрочных прогнозов, поскольку только небольшая часть даже макроэлементов выщелачивается в этих пределах L/S. Таким образом, потенциально важные процессы (например, расход минеральной фазы, обуславливающей выщелачивание) могут быть упущены. Другими словами, современные лабораторные исследования описывают лишь незначительную часть общего потенциала загрязнения, особенно для ЛЗ. Этих ограниченных знаний недостаточно при создании и проверке моделей прогнозирования выщелачивания для оценки долгосрочных экологических последствий использования или захоронения ОСТКО [11]. Поэтому для прогнозирования выделения металлов из ОСТКО и дальнейшего описания их поведения при выщелачивании широко используется геохимическое моделирование [10–12, 30, 31].

В [11] рекомендуется на первом этапе рассчитать состав раствора. Обычно используются аналитические данные pH-статических экспериментов. Затем рассчитывается состав образца с использованием аналитически определенных концентраций элементов; при этом pH поддерживается на уровне измеренного значения. Наконец, определяется относительное содержание различных видов вместе с индексами насыщения (SI) возможных минералов.

На втором этапе предполагается, что процессы растворения/осаждения минералов, близких к равновесию с анализируемыми растворами ($-1 < SI < +1$), определяют концентрации в растворе многих элементов. Потенциальные контролирующие минералы выбираются из списка, созданного при расчете химического состава. Часто список бывает весьма большим, поэтому рекомендуется сравнение с минералогическими исследованиями. Наконец, рассчитывается состав фильтрата при равновесии с выбранными минералами. Таким образом, прогнозы модели можно сравнить с измеренными данными.

Для дальнейшего улучшения прогнозов модели следует включить как сорбцию на активных поверхностях, так и комплексообразование с РОУ. Применение этого подхода к данным о pH-статическом выщелачивании обычно приводит к хорошей согласованности между прогнозными моделями и экспериментально определенными концентрациями элементов.

На третьем этапе в модель заносятся “доступные” фракции всех элементов. Для каждого элемента во входном файле есть только одно значение (в моль/кг). Затем, например, количество

“доступного” Са в моль/кг распределяется между Са-содержащими минералами, полученными на втором этапе. Это выполняется для всех рассмотренных элементов. Для макроионов (например, Ca^{2+} , Al^{2+} , SO_4^{2-}) и металлов, не образующих оксианионы (например, Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+}), неявно предполагается, что их “доступную” фракцию отражают их концентрации, наблюдаемые в фильтрах при низких значениях pH (обычно $\text{pH} \sim 4$). При этом большая часть минералов, обуславливающих растворимость элементов, будет растворена, и сорбцию на HFO/AlO можно исключить. Для элементов, которые образуют оксианионы (например, AsO_4^{3-} , CrO_4^{2-} , MoO_4^{2-}), ожидается, что “доступную” фракцию будут отражать значения, полученные при $\text{pH} \sim 10$.

Наконец, модель распределяет “доступное” количество элемента между основными процессами, связанными с его выделением, при различных значениях pH ($2 < \text{pH} < 14$ по умолчанию). Все расчеты выполняются одновременно, чтобы учесть конкуренцию [11].

На основании результатов моделирования pH-статических экспериментов можно предположить, что комбинация данных pH-статического выщелачивания и данных о выщелачивании из колонки для одного и того же материала может обеспечить адекватный набор входных параметров для прямого геохимического моделирования выщелачивания из гранулированных материалов. Однако прямое применение результатов, полученных в результате pH-статических серийных тестов, для долгосрочных прогнозов выщелачивания несколько проблематично. Единственный серийный эксперимент, который может дать некоторое описание реального выщелачивания, — это серийный тест, проводимый при естественном pH твердого материала. В любом другом серийном тесте при меняющихся значениях pH история выщелачивания не учитывается, поскольку для каждой серии используется свежая порция материала. Следовательно, во время pH-статического теста возникают условия, которые не существуют в сценариях полномасштабного выщелачивания (например, высокие уровни растворимых солей при низких значениях pH, поскольку такие соли будут растворяться прежде, чем изменится pH).

При моделировании инфильтрации краткосрочное количественное определение выщелачивания ($L/S < 2$ л/кг) предположительно может быть выполнено с использованием полномасштабных данных. С другой стороны, долгосрочные количественные оценки выщелачивания (на столетия) в значительной степени полагаются на перспективное геохимическое моделирование, поскольку данные о полномасштабном выщелачивании явно недоступны. В настоящее время эксперименты по инфильтрации используются как для получения входных данных, так и для

проверки модели. Учитывая вышеупомянутые различия между лабораторными и натурными условиями, представляется сомнительным, что простое масштабирование может обеспечить адекватное описание полномасштабных сценариев. Поэтому до любых прогнозов выщелачивания следует понимать и оценивать возможные воздействия на результаты экспериментов различных условий лабораторных и полномасштабных сценариев.

По результатам моделирования в [11] представлен перечень минеральных фаз, определяющих растворимость элементов (табл. 3), который хорошо согласуется с результатами других исследований, как для шлака, так и для ЛЗ. Также отмечено участие РОУ в выщелачивании (например, Cu). Использование такого общего набора минералов может обеспечить адекватное описание pH-зависимого выщелачивания для любого ОСТКО. Это уменьшит необходимость проведения дорогостоящих и трудоемких экспериментов по pH-статическому выщелачиванию конкретного материала.

ОБРАБОТКА ОСТКО ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Исследовательскими группами были предложены и продемонстрированы различные инновационные решения по обращению с ОСТКО [29]. Как правило, предлагаемые новые технологии направлены на решение требований местного законодательства, проблем с существующими приложениями и с количествами ОСТКО, образующихся в разных странах. Основная экологическая проблема обращения с ОСТКО — выщелачивание ЗВ в окружающую среду из захороненных остатков и переработанных материалов, полученных в результате их применения. Для уменьшения этих воздействий применяются различные методы обработки. Эти методы используются и для шлака, и, в большей степени, для ЛЗ.

В табл. 4 приведена сводка принципов и методов обработки ОСТКО. Лишь небольшая часть предлагаемых методов в настоящее время используется в коммерческих целях, часто методы были протестированы только в лабораторном или пилотном масштабе [18, 19].

Из-за высокотемпературного сжигания отходов ОСТКО не являются термодинамически стабильными в атмосферных условиях. Обработка *выдерживанием* и *выветриванием* может значительно изменить химические и минералогические характеристики ОСТКО за счет гидролиза Na, K, Al и Ca, растворения/осаждения гидроксидов и солей, карбонизации, нейтрализации pH, реакций окисления/восстановления и образования глинистых минеральных фаз. Геохимические процессы, вызванные выветриванием, изменяют макроскопические свойства остатков, включая

Таблица 3. Обзор минеральных фаз и РОУ, определяющих растворимость элементов [11]

Элемент	Минералы и РОУ
Al	гиббсит ($\text{Al}[\text{OH}]_3$), вайрацит ($\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), моносльфат ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6[\text{SO}_4] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
Ba	(Ba,Sr) SO_4 , витерит (BaCO_3)
Ca	гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
Mg	доломит ($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$), форстерит (Mg_2SiO_4), магнезит (MgCO_3)
S	гипс
Si	акерманит ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), SiO_2 , вайрацит ($\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
Cd	$\text{Cd}(\text{OH})_2$, отавит (CdCO_3)
Cu	атакамит ($\text{Cu}_2[\text{OH}]_3\text{NO}_3$), РОУ, $\text{Cu}(\text{OH})_2$
Mo	повеллит (CaMoO_4), вольфенит (PbMoO_4)
Pb	англезит (PbSO_4), $\text{Pb}_3(\text{VO}_4)_2$, $\text{Pb}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$, РОУ
Sr	(Ba,Sr) SO_4 , стронцианит (SrCO_3)
Zn	цинкит (ZnO)

Таблица 4. Сводка принципов и методов обработки ОСТКО [18]

Принципы обработки	Процессы/методы
Химическая и физическая сепарация	Промывание
	Электрокинетическая ремедиация
	Вихретоковая сепарация
	Электролиз
	Химическая экстракция/перевод в подвижное состояние
	Химическое осаждение
	Кристаллизация/испарение
	Адсорбция
	Дистилляция
	Ионный обмен
Стабилизация и отверждение	Магнитная сепарация
	Сепарация на основе плотности и размера частиц
	Химическая стабилизация
	Гидротермическое отверждение
	Ускоренная карбонизация
Термическая обработка	Выдерживание/выветривание
	Использование вяжущих и добавок
	Остекловывание
	Плавление
	Спекание
	Испарение/конденсация

pH и кислотонейтрализующую способность, окислительно-восстановительный потенциал, а также сорбционную и ионообменную способность. Между тем новообразование реактивных и сорбирующих минеральных фаз, в свою очередь, влияет на выщелачивание, растворимость и комплексообразование ТМ в ОСТКО. Например, выветривание способно увеличить содержание

(гидр)оксидов алюминия, тем самым образуя реактивную поверхность, удерживающую Cu и Zn от выщелачивания [18].

Карбонизация – первичная реакция в процессе выветривания, вызывающая снижение pH. Ускоренная карбонизация – термодинамически предпочтительный процесс, в основном связанный с природным выветриванием и выдерживанием.

В результате реакции между CO_2 и щелочью ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) изменяются минералогические характеристики, при этом образуются карбонаты. Наиболее очевидным эффектом карбонизации является нейтрализация щелочных ОСТКО. Другой эффект – связывание макро- и микроэлементов металлов путем сорбции на вновь образовавшихся глинистых минералах, например, на Al-(гидр)оксидах, кальците и эттрингите. Образующиеся кальцит и эттрингит могут удерживать ТМ (Cu, Zn, Cr, Cd и Pb), которые плотно инкапсулируются в матрицу Ca/Si за счет замещения Ca [18]. Однако было отмечено, что карбонизация сильно влияет на выщелачивание некоторых ТМ, в основном Mo, W, Cu, Pb и Zn, увеличивая их концентрации в фильтрате (от 1 до 10 мг/л) [26].

Карбонизацию можно ускорить, подвергая щелочные материалы воздействию воздуха, обогащенного диоксидом углерода (например, дымового газа). Этот метод имеет значительные преимущества перед традиционными технологиями отверждения/стабилизации на основе гидратации [26]: снижение выщелачиваемости некоторых катионов металлов из-за более низкого pH в полностью карбонизированной системе (примерно до 8.3); превращение катионов металлов в карбонаты (а не в гидроксиды) и/или, возможно, в комплексы металл–силанол (M–O–Si); повышение устойчивости полученного материала и снижение его проницаемости за счет осаждения кальцита в поровых пространствах.

Отверждение включает в себя все процессы, основная цель которых – физическая и гидравлическая герметизация ОСТКО [19]. Главное внимание уделяется минимизации выщелачивания ТМ после окончательного захоронения. Часто рассматриваются совместные процессы отверждения и стабилизации (S/S – solidification and stabilization). Это означает, что во многих процессах отверждения металлы также подвергаются реакциям химической стабилизации и связывания с компонентами гидравлического вяжущего вещества⁷ (например, фиксация ТМ в цементных минералах). Основные преимущества методов отверждения – уменьшение выщелачивания и улучшение механических свойств. При этом обычно используется относительно простая технология. Основные недостатки: по мере обработки масса и объем увеличиваются, а физическая целостность продукта (применяемого, например, в качестве заполнителя в бетоне) может со временем ухудшаться в зависимости от выбора вяжущего вещества [19]. Для связывания опасных компонентов, присутствующих в ОСТКО, во время процесса S/S используются различные *добавки, стабилизаторы и вяжущие вещества*. Основная цель этого процесса – минимизировать растворимость, вы-

щелачиваемость и токсичность загрязнителей. Обработка S/S обычно включает ускоренную карбонизацию и химическую стабилизацию [18].

Процессы *термической обработки* включают нагревание ОСТКО и, таким образом, изменение физических и химических свойств, а в некоторых случаях также инкапсуляцию. Основное внимание уделяется производству стабильного продукта с приемлемыми выщелачивающими свойствами. Термическая обработка также может служить основой для разделения металлических фаз из-за различия температур плавления [19].

Авторы работы [5] рассмотрели современные процессы обработки ОСТКО в Японии и сделали вывод, что термические процессы (в основном плавление) лучше с позиций разрушения СОМЗ, а также восстановления и повторного использования материалов. Главное преимущество – получается очень плотный и стабильный продукт с хорошими выщелачивающими свойствами. Но затраты на обработку на порядок выше, чем, например, для S/S. Кроме того, образуются дымовые газы, содержащие летучие металлы [19].

Основными методами термической обработки ОСТКО являются *спекание*⁸, *остекловывание*⁹ и *плавление*¹⁰ [16]. Процессы термической обработки в основном различаются на основе характеристики полученного продукта, а не самого процесса. Например, при остекловывании образуется стеклообразная фаза, а в процессе плавления образуется кристаллический или гетерогенный продукт [18].

⁸ Спекание (коалесценция) – слияние капель или пузырей и уплотнение пористых твердых частиц ниже точек плавления их основных компонентов [18] в диапазоне температур обычно – 700–1200°C. Спекание приводит к продукту с меньшей пористостью, большей прочностью и плотностью по сравнению с исходным материалом. Выщелачиваемость вредных компонентов снижается из-за уменьшения пористости [16, 25]. Некоторые ТМ (Cd, Pb и Hg) испаряются и не обнаруживаются в продуктах спекания. Спекание сводит к минимуму выщелачивание ОСТКО и позволяет производить различные типы продуктов (заполнители в бетоне, керамическая плитка и прочая монолитная керамика) [18].

⁹ *Остекловывание* (витрификация) – химический процесс, при котором смесь материалов-предшественников стекла и отходов сплавляется при высоких температурах с образованием жидкой фазы, которая затем охлаждается с образованием аморфного, однородного однофазного стекла. Типичные температуры: 1100–1500°C [20, 24], по другим данным до 2000°C [18]. При остекловывании опасные элементы испаряются либо включаются в стекловидную фазу путем химического связывания или инкапсуляции [20], СОМЗ обычно разрушаются [16].

¹⁰ Процессы *плавления* аналогичны процессам остекловывания, но, как правило, не используются никакие добавки; конечный продукт обычно представляет собой гетерогенную шлаковую смесь, состоящую из стеклообразного материала и кристаллических фаз. Температуры обычно от 1200 до 1600°C [20, 26], токсичные органические соединения разрушаются. Поведение продукта систем плавления ОСТКО при выщелачивании аналогично продуктам остекловывания [16].

⁷ Гидравлические вяжущие вещества твердеют и длительно сохраняют свои свойства в воде.

Основные преимущества процессов остекловывания ОСТКО:

- включение большого количества токсичных металлов в неорганические стекла;

- получение стекол, инертных по отношению к большинству химических и биологических агентов, поэтому их можно безопасно захоронить на полигонах отходов или использовать для строительства дорог, тротуаров, насыпей и т.д.;

- остекловывание – это зрелая, тщательно изученная технология;

- остекловывание приводит к значительному уменьшению объема отходов.

Процессы плавления и остекловывания ОСТКО обычно не используются в Европе и США, в основном из-за больших затрат, связанных с высоким потреблением энергии. Так, для плавления 1 т золы требуется до 1 МВт·ч энергии, что означает затраты порядка 30–60 долларов США на 1 т сжигаемых отходов [27]. Но в Японии многие заводы по сжиганию отходов оснащены плавильными печами для обработки, как золы фильтров, так и шлака.

При экстрагировании ТМ путем *микробиального выщелачивания* (биовыщелачивания)¹¹ используются микроорганизмы для: 1) облегчения окислительно-восстановительных реакций, 2) образования кислот или 3) формирования комплексообразователей. Этот процесс применяется для извлечения металлов в горнодобывающей промышленности, он включает ферментативное окисление/восстановление до твердых соединений или взаимодействие с продуктами метаболизма. В то время как для эффективного удаления или извлечения металлов из ОСТКО могут применяться традиционные методы (например, термическая обработка, испарение хлоридов и химическое выщелачивание), биовыщелачивание рассматривается как более чистая производственная технология для восстановления ресурсов с меньшими затратами и меньшей потребностью в энергии [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сжигание твердых коммунальных отходов (СТКО) – распространенный метод их обработки, так как он позволяет резко уменьшить объем

отходов, направляемых на захоронение. При сжигании образуются так называемые остатки СТКО (ОСТКО), которые перед захоронением или использованием необходимо дополнительно обрабатывать для уменьшения воздействия на окружающую среду токсичных компонентов. Известны два основных типа ОСТКО: шлак и летучая зола (ЛЗ). Их состав существенно различается, причем ЛЗ содержит значительно больше загрязняющих веществ (ЗВ), включая тяжелые металлы (ТМ) и диоксины, и классифицируется как опасные отходы. Тем не менее многие аспекты обращения с ОСТКО схожи для шлака и ЛЗ: проблемы рециклинга, экологическое регулирование, оценка токсичности, методы тестирования и геохимического моделирования выщелачивания ЗВ, способы обработки.

Выщелачивание ЗВ – основная проблема при захоронении и переработке ОСТКО. Поэтому предварительно требуется количественная оценка выщелачивания. Тесты различаются по испытательной установке, отношению жидкой и твердых фаз, размеру частиц материала и продолжительности тестирования. Различаются серийные тесты (зависимости от рН или без регулирования рН), тесты с колонкой, тесты для связанных применений (таких как использование шлака в качестве заполнителя в бетоне); натурные тесты или тесты с реакторами-имитаторами полигонов отходов. Из-за общей сложности процесса выщелачивания считается, что один тип тестов не может дать адекватного описания явлений, регулирующих высвобождение ЗВ. Поэтому, чтобы получить лучшую оценку поведения материала при выщелачивании в конкретном сценарии, следует использовать комбинацию различных типов тестов.

В результате многочисленных исследований с различными ОСТКО были идентифицированы основные типы процессов выщелачивания элементов, связанные с: (I) доступностью легкорастворимых минералов, (II) растворимостью минеральных фаз и (III) сорбцией на активных поверхностях и/или комплексообразованием с РОУ. При этом механизм выщелачивания для данного элемента может меняться во времени. Предполагается, что результаты экспериментов с колонками могут быть использованы для оценки полномасштабного выщелачивания элементов групп I и II. Для группы III необходимо описать зависящую от времени миграцию РОУ в тестируемой системе.

рН – один из наиболее важных факторов, регулирующих выщелачивание как неорганических, так и органических компонентов из твердой фазы в раствор. Выщелачивание ТМ сильно зависит от рН, но характер зависимости для разных видов металлов различен. Большинство из них (например, Cd, Cu, Pb и Z) следуют механизму *катионного выщелачивания*. Максимальное выщелачивание As наблюдается в сильноокислых

¹¹ Исследователи использовали для биовыщелачивания три основные группы микроорганизмов: автотрофные бактерии (например, *Thiobacilli* spp.), гетеротрофные бактерии (например, *Pseudomonas* spp. и *Bacillus* spp.) и гетеротрофные грибы (например, *Aspergillus* spp. и *Penicillium* spp.). Эти микроорганизмы выделены из природной среды и характеризуются высокой относительной численностью видов в ней. Их использование для процесса биовыщелачивания ОСТКО должно оказывать минимальное воздействие на окружающую среду или здоровье человека. Наиболее часто используемый гриб для биовыщелачивания ОСТКО – это *Aspergillus niger*, который производит органические кислоты (например, лимонную кислоту, шавелевую кислоту и глюконовую кислоту) и задействует ацидолиз в качестве механизма выщелачивания.

(рН ~2) и сильнощелочных (рН ~12) условиях и относится к *амфотерному типу выщелачивания*. Се проявляет *оксидионный характер* выщелачивания: самые высокие концентрации достигаются в сильнощелочных условиях (рН >11).

Краткосрочное количественное определение выщелачивания может быть выполнено непосредственно с использованием полномасштабных данных. Но долгосрочные количественные оценки (на столетия) в значительной степени опираются на перспективное геохимическое моделирование.

По результатам геохимического моделирования получен перечень минеральных фаз, определяющих растворимость элементов. Использование этого общего набора минералов может обеспечить адекватное описание рН-зависимого выщелачивания для любого данного ОСТКО.

Для уменьшения выщелачивания ЗВ в окружающую среду из захороненных ОСТКО и или произведенных из них материалов применяются различные методы обработки. В основном это химическая и физическая сепарация (процессы, включающие экстракцию и удаление определенных компонентов), стабилизация и отверждение (процессы связывания и удерживания ЗВ с помощью химических реакций) и термическая обработка (процессы, связанные с нагреванием ОСТКО и изменением их физических и химических характеристик). Предлагается также экстрагирование ТМ путем биовыщелачивания.

Описанные проблемы обращения с ОСТКО и оценки выщелачивания относятся как к шлаку, так и к ЛЗ. Однако из-за существенно различающегося состава этих ОСТКО особенности выщелачивания ЗВ, допустимость захоронения и возможности использования необходимо исследовать отдельно для шлака и ЛЗ. Эти вопросы будут проанализированы в дальнейшем.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № г.р. 122022400104-2 “Техногенез и природа: геоэкологические проблемы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Yuganova T.I. [Methodology of the environmental life cycle assessment of municipal solid waste. Conceptual issues and examples of application]. *Geoekologiya*, 2020, no. 5, pp. 3–23. (in Russian)
2. Blasenbauer D., Huber F., Lederer J., Quina M.J., Blanc-Biscarat D., et al. Legal situation and current practice of waste incineration bottom ash utilisation in Europe]. *Waste Management*, 2020, vol. 102, pp. 868–883.
3. Di Gianfilippo M., Hyks J., Verginelli I., Costa G., et al. Leaching behaviour of incineration bottom ash in a reuse scenario: 12 years-field data vs. lab test result]. *Waste Management*, 2018, vol. 73, pp. 367–380.
4. Dijkstra J.J., Meeussen J.C., van der Sloot H.A., Comans R.N. A consistent geochemical modelling approach for the leaching and reactive transport of major and trace elements in MSWI bottom ash. *Applied Geochemistry*, 2008, vol. 23, no. 6, pp. 1544–1562.
5. Ecke H., Sakanakura H., Matsuto T., Tanaka N., Lagerkvist A. State-of-the-art treatment processes for municipal solid waste incineration residues in Japan. *Waste Management & Research*, 2000, vol. 18, no. 1, pp. 41–51.
6. EN 12457-1:2002 – Characterisation of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges – Part 1: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 2 l/kg for materials with high solid content and with particle size below 4 mm (without or with size reduction). URL: <https://www.en-standard.eu/une-en-12457-1-2003-characterisation-of-waste-leaching-compliance-test-for-leaching-of-granular-waste-materials-and-sludges-part-1-one-stage-batch-test-at-a-liquid-to-solid-ratio-of-2-l-kg-for-materials-with-high-solid-content-and-with-particle-size-below/> (accessed 26.03.2023)
7. EN 12457-2:2002 – Characterisation of waste – Leaching; Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges – Part 2: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for material with particle size below 4 mm (without or with size reduction). URL: <https://ru.scribd.com/document/511437969/BS-EN-12457-2-2002> (accessed 26.03.2023)
8. EN 12457-3:2002 – Characterization of waste – Leaching; Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges – Part 3: Two stage batch test at a liquid to solid ratio of 2 l/kg and 8 l/kg for materials with high solid content with particle size below 4 mm (without or with size reduction). URL: <https://www.en-standard.eu/une-en-12457-3-2003-characterisation-of-waste-leaching-compliance-test-for-leaching-of-granular-waste-materials-and-sludges-part-3-two-stage-batch-test-at-a-liquid-to-solid-ratio-of-2-l-kg-and-8-l-kg-for-materials-with-high-solid-content-and-with-particle/> (accessed 26.03.2023)
9. EN 12457-4:2002 – Characterisation of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges – Part 4: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 10 mm (without or with size reduction). URL: <https://genorma.com/en/project/show/cen:proj:14489> (accessed 26.03.2023)
10. Haiying Z., Youcai Z., Jingyu Q. Characterization of heavy metals in fly ash from municipal solid waste incinerators in Shanghai. *Process Safety & Environmental Protection*, 2010, vol. 88, no. 2, pp. 114–124.
11. Hykš J. Leaching from Municipal Solid Waste Incineration Residues: Ph. D. thesis / Technical University of Denmark, Department of Environmental Engineering, 2008, 64 p. <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/961973> (accessed 26.03.2023)
12. Hyks J., Astrup T., Christensen T.H. Long-term leaching from MSWI air-pollution-control residues: Leaching characterization and modeling. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 162, no. 1, pp. 80–91.
13. Kylefors K., Andreas L., Lagerkvist A. A comparison of small-scale, pilot-scale and large-scale tests for predicting leaching behaviour of landfilled wastes. *Waste Management*, 2003, vol. 23, no. 1, pp. 45–59.
14. Lam C.H.K., Ip A.W.M., Barford J.P., McKay G. Use of incineration MSW ash: A review. *Sustainability*, 2010, vol. 2, no. 7, pp. 1943–1968.

15. Li W., Sun Y., Huang Y., Shimaoka T., Wang H., Wang Y., Ma L., Zhang D. Evaluation of chemical speciation and environmental risk levels of heavy metals during varied acid corrosion conditions for raw and solidified/stabilized MSWI fly ash. *Waste Management*, 2019, vol. 87, pp. 407–416.
16. Lindberg D., Molin C., Hupa M. Thermal treatment of solid residues from WtE units: a review. *Waste Management*, 2015, vol. 37, pp. 82–94.
17. Liu A., Ren F., Lin W.Y., Wang J.-Y. A review of municipal solid waste environmental standards with a focus on incinerator residues. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2015, vol. 4, no. 2, pp. 165–188.
18. Luo H., Cheng Y., He D., Yang E.-H. Review of leaching behavior of municipal solid waste incineration (MSWI) ash. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 668, pp. 90–103.
19. Management of APC Residues from W-t-E Plants. An overview of management options and treatment methods: Second edition / T. Astrup, Department of Environmental Engineering Technical University of Denmark; ISWA-WG Thermal Treatment of Waste, Subgroup APC Residues from W-t-E plants. ISWA, 2008. 51 pp. URL: https://books.google.se/books/about/Management_of_APC_Residues_from_W_t_E_Pl.html?id=WGh9XwAACAAJ&redir_esc=y (accessed 26.03.2023)
20. Municipal solid waste incinerator residues / IAWG (International Ash Working Group: A.J. Chandler, T.T. Eighmy, O. Hartlén, D. Kosson, S.E. Sawell, H. van der Sloot, J. Vehlow), Amsterdam, Elsevier Science, 1997, 973 p. (Studies in Environmental Science. Vol. 67). URL: <https://www.elsevier.com/books/municipal-solid-waste-incinerator-residues/chandler/978-0-444-82563-6> (accessed 18.04.2023)
21. NEN 7375:2004 nl – Leaching characteristics – Determination of the leaching of inorganic components from moulded or monolithic materials with a diffusion test – Solid earthy and stony materials, The Netherlands. 39 pp. (in Dutch). URL: <https://www.nen.nl/en/nen-7375-2004-nl-91729> (accessed 26.03.2023)
22. Nikravan M., Ramezani-pour A.A., Maknoon R. Study on physicochemical properties and leaching behavior of residual ash fractions from a municipal solid waste incinerator (MSWI) plant. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 260, article 110042.
23. Quina M.J., Bordado J.C., Quinta-Ferreira R.M. Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: An overview. *Waste Management*, 2008, vol. 28, no. 11, pp. 2097–2121.
24. Sabbas T., Poletini A., Pomi R., Astrup T., Hjelmar O., et al. Management of municipal solid waste incineration residues. *Waste Management*, 2003, vol. 23, no. 1, pp. 61–88.
25. Sakai S.-I., Hiraoka M. Municipal solid waste incinerator residue recycling by thermal processes. *Waste Management*. 2000, vol. 20, no. 2–3, pp. 249–258.
26. Testing of Residues from Incineration of Municipal Solid Waste: Science report P1-494/SR2 / Environment Agency, UK, 2004, 126 p. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/290379/scho0105bijb-e-e.pdf (accessed 26.03.2023)
27. Vehlow J., Bergfeldt B., Hunsinger H. PCDD/F and related compounds in solid residues from municipal solid waste incineration – a literature review. *Waste Management & Research*, 2006, vol. 24, no. 5, pp. 404–420.
28. Weibel G., Eggenberger U., Schlumberger S., Mäder U.K. Chemical associations and mobilization of heavy metals in fly ash from municipal solid waste incineration. *Waste Management*, 2017, vol. 62, pp. 147–159.
29. Wong S., Mah A.X.Y., Nordin A.H., Nyakuma B.B., Ngadi N., et al. Emerging trends in municipal solid waste incineration ashes research: a bibliometric analysis from 1994 to 2018. *Environmental Science & Pollution Research*, 2020, vol. 27, no. 8, pp. 7757–7784.
30. Zhang H., He P.-J., Shao L.-M., Li X.-J. Leaching behavior of heavy metals from municipal solid waste incineration bottom ash and its geochemical modeling. *Journal of Material Cycles & Waste Management*, 2008, vol. 10, no. 1, pp. 7–13.
31. Zhang Y., Cetin B., Likos W.J., Edil T.B. Impacts of pH on leaching potential of elements from MSW incineration fly ash. *Fuel*, 2016, vol. 184, pp. 815–825.

RESIDUES FROM MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATION: COMPOSITION, GROUNDWATER POLLUTANT LEACHING, TREATMENT TO REDUCE ENVIRONMENTAL IMPACT

T. I. Yuganova^{a,#}, and V. S. Putilina^{a,##}

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS,
Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

[#]*E-mail: tigryu@gmail.com*

^{##}*E-mail: vputilina@yandex.ru*

Incineration is a common method for treating municipal solid waste, which reduces its mass by 70% and volume by up to 90%. However, most of the non-combustible components are subsequently concentrated in a relatively small amount of incineration residues – bottom ash and fly ash – which must be further processed and / or landfilled. The article describes the formation and composition of incineration residues, issues of recycling and environmental regulation, leaching of pollutants and the problems of its testing, methods of treating incineration residues to reduce environmental impact.

Keywords: *municipal solid waste, MSW, MSW incineration residues, bottom ash, fly ash, heavy metals, recycling, assessing toxicity, leaching, leaching testing, leaching processes, incineration residue treatment*

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА
ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 504; 502.64

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОФИЛЬ ГОРОДА
ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

© 2023 г. В. Г. Заиканов^{1,*}, Т. Б. Минакова¹, Е. В. Булдакова¹

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

*E-mail: v.zaikanov@mail.ru

Поступила в редакцию 04.08.2023 г.

После доработки 28.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

В статье рассматриваются современные подходы к планированию городских территорий в условиях реализации федерального проекта “Формирование комфортной городской среды”. Предлагается создание “геоэкологического профиля города” на основе систематизации разнородной информации о городе и геоэкологических процессах, часто являющихся ограничением для развития городского пространства. Формирование такого профиля позволит интегрировать геоэкологические данные в документы стратегического территориального развития и планирования городских территорий. Оно будет способствовать эффективному планированию устойчивого и безопасного развития городов.

Ключевые слова: геоэкологический профиль города, геоэкологические данные, информационные системы, эффективность планирования

DOI: 10.31857/S0869780923050089, EDN: FREI0H

ВВЕДЕНИЕ

В контексте глобальных изменений в природе и обществе существуют первоочередные задачи адаптации национальной системы пространственного планирования к современным реалиям глобальной урбанизации. Сегодня понятия “Зеленый город” и “Умный город” становятся все более популярными как в мире, так и в России [6, 9]. Понятно, что при таких подходах стратегия градостроительного освоения переходит на качественно новые принципы работы с использованием достоверных данных для управления городскими территориями. Принятие эффективных решений, направленных на градостроительное развитие города в области планирования, возможно только при наличии актуальной информации об объектно-пространственных изменениях, происходящих на его территории. Перевод экономики и социальной сферы на использование информационных систем при реализации нового разрабатываемого национального проекта “Экономика данных” приведет к глубокому разрыву между новыми потребностями в актуальной информации и существующим уровнем мониторинга, а также статистическими показателями-индикаторами в экономической, социальной и экологической сферах.

В настоящее время ведется активная работа по созданию разнообразных баз данных (БД) и геоин-

формационных систем (ГИС) в области управления городскими территориями. Существует целый ряд как открытых тематических, так и коммерческих проектов по предоставлению различной информации о городе. Однако в экологическом блоке этих БД содержится крайне ограниченное число параметров, среди которых практически полностью отсутствуют данные о геоэкологических ограничениях, процессах и явлениях. Особенно актуально наличие подобных данных, учитывая современную тенденцию к расширению городов в сторону неосвоенных природных территорий. Это сказывается на ухудшении качества земель, вызывает активизацию экзогенных геологических процессов и влияет на загрязнение водоемов и почв.

Целью настоящих исследований является попытка формирования “геоэкологического профиля города”, как упорядоченной структуры разрозненных данных, интегрируемых в единую систему, позволяющую проводить более эффективное планирование городской территории. Этот инструмент должен объединить информацию о различных сферах городского развития (экономической, социальной, экологической, включая геоэкологические опасности), что обеспечит анализ постоянного взаимодействия развития города и изменений состояния окружающей среды. В итоге это позволит выявить экологические и геоэкологические опасности и найти пути их предупреждения. Одной из задач

“геоэкологического профиля города” является подготовка стратегической панорамы наблюдаемых и развивающихся в городе опасных геоэкологических процессов и явлений. Это послужит руководством к действиям, предпринимаемым государственными органами и населением в плане управления городской средой.

Информационной основой построения геоэкологического профиля должны являться первичные данные из официальных, регулярно обновляемых, преимущественно открытых источников, в том числе данные экологического и геологического мониторингов, материалы дистанционного зондирования земли (ДДЗ), которые должны быть структурированы в самостоятельную БД.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ГОРОДСКОЙ ТЕРРИТОРИИ

Решение прикладных задач при планировании развития городов предполагает применение систематизированной территориальной информации и разработку новых показателей, позволяющих сравнивать результаты в экономической, социальной и экологической областях.

Назначение Федеральной государственной информационной системы территориального планирования (ФГИС ТП) – предоставление информации органам государственной власти и местного самоуправления для планирования и управления городскими пространствами. Цель ФГИС ТП – обеспечение согласования документов территориального планирования по развитию территории на муниципальном, региональном, федеральном уровнях. ФГИС ТП должна содержать данные государственных и муниципальных информационных систем (ИС).

Осуществление градостроительной деятельности неразрывно связано с анализом и обработкой пространственных данных, а также необходимостью повышения эффективности принимаемых решений в сфере планирования и управления городской территорией. Это обусловило создание “Государственной информационной системы обеспечения градостроительной деятельности” (ГИСОГД) со своими Правилами ведения ИС и Порядком предоставления доступа к сведениям, содержащимся в ней¹.

Целью ведения ГИСОГД является обеспечение органов государственной власти, органов местного самоуправления, физических и юридических лиц достоверными сведениями, необхо-

димыми для осуществления градостроительной деятельности².

Главная задача ГИСОГД – систематизация актуальных данных об использовании муниципальной/государственной земли для строительства. Формируется банк данных о современном состоянии, использовании и условиях использования территории для эффективного принятия решений органами государственной власти и местного самоуправления в вопросах территориального планирования и развития территорий, инвестиционной и хозяйственной деятельности. Это также необходимо для осуществления контроля над использованием городской территории, резервирования земельных участков согласно планам развития.

ГИСОГД включает 18 разделов, из которых первые три непосредственно связаны с документами территориального планирования на разных уровнях (федеральный, субъектный, муниципальный), а четырнадцатый раздел – с программами реализации документов территориального планирования.

ИС должна содержать информацию, необходимую для подготовки документов территориального планирования в различном разрезе и на различных уровнях. Это отраслевые и региональные стратегии социально-экономического развития, проекты документов территориального планирования с их обоснованием. Важное место в ИС занимают цифровые топографические карты; информация о границах субъектов, муниципальных образований, населенных пунктов; об объектах культурного наследия, об особо охраняемых природных территориях (ООПТ); о территориях, подверженных риску возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и др. (ст. 57.1)³.

Информационное обеспечение градостроительной деятельности – это не столько программное обеспечение, сколько корректные и актуальные данные о территории (прежде всего пространственные). Картографической основой ГИСОГД является картографическая основа Единого государственного реестра недвижимости³ (ст. 56.2.2.1).

Применительно к городам ГИСОГД включает: предусмотренные генеральными планами муниципальных округов и городских округов (ГО) карты функциональных зон, карты планируемого размещения объектов местного значения, а также положения о территориальном планировании; основную часть проекта планировки территории; материалы и результаты инженерных изысканий;

² Федеральный закон от 03.08.2018 № 342-ФЗ. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43495>

³ Градостроительный кодекс Российской Федерации (Федеральный закон от 13.06.2023 № 240-ФЗ). URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49367>

¹ Постановление Правительства РФ от 13 марта 2020 г. № 279 “Об информационном обеспечении градостроительной деятельности”. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564464932>

сведения о границах зон с особыми условиями использования территорий и об их характеристиках, в том числе об ограничениях использования земельных участков в границах таких зон; положение о ООПТ, лесохозяйственные регламенты лесничества, расположенного на землях лесного фонда и др. Эти данные должны представляться в открытом доступе; формат просмотра – векторные модели (карты) с характеристиками объектов и текстовые файлы, содержащие положение о территориальном планировании.

Для формирования БД “геоэкологического профиля города” наибольший интерес, кроме карт генпланов, будут представлять следующие данные ИС:

- распределение земель муниципалитета,
- планирование застройки;
- результаты инженерных проверок, включающих анализ природных условий и свидетельствующих об отсутствии/наличии риска катастроф.

Реестр документов в области инженерных изысканий, проектирования, строительства и сноса (ст. 57.4)⁴ является государственным информационным ресурсом и будет общедоступным.

К сожалению, в отдельных разделах ИС не конкретизируется структура данных. Однако, исходя из многолетнего опыта работы с документами планирования городских территорий в России, особенно последних лет [4, 5], следует ожидать недостаточность отражения в БД ИС экологических (включая геоэкологические) негативных ситуаций. Поэтому в целях обеспечения безопасности муниципальных округов и ГО, считаем необходимым включать в БД ИС сведения о существующем и потенциально возможном геоэкологическом состоянии территории, представляющем опасность для жизнедеятельности человека.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ В ДОКУМЕНТАХ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ГОРОДОВ

Основная задача территориального планирования городской территории – создание условий для устойчивого развития территории, сохранения окружающей природной среды и объектов культурного наследия, а также повышения инвестиционной привлекательности города.

В настоящее время развитие города находит отражение в трех документах: Генплан, Стратегия развития города и Мастер-план.

До последнего времени считалось, что генеральный план муниципального образования предлагал наиболее эффективные пути решения возможных проблем и помогал поставить цели развития города. При этом территориальное пла-

нирование базировалось на изучении природных условий в сочетании с антропогенной нагрузкой. В Генпланах последних лет, к сожалению, часто отсутствуют текстовые материалы обоснования проектных решений на базе учета природных особенностей городской территории.

На сегодняшний день стратегическое планирование на уровне городов и регионов стало не только управленческой практикой, но и предметом научного осмысления, зачастую весьма критического. Стратегическим планам в большей степени присущ концептуальный характер. Система показателей, применяемых в стратегическом планировании, включает несколько блоков: демографический, оценки уровня жизни (величина заработной платы, размеры пенсий и т.д.), оценки качества жизни и др. В блоке качества жизни наряду с ее продолжительностью и уровнем здоровья населения учитываются анализ экологической обстановки (состояние воды, воздуха, почвы, уровень радиации и шума), оценка уровня криминогенной ситуации в городе, оценка возможностей получения образования и услуг в сфере культуры, спорта, досуга. Для сохранения безопасности городской среды этого явно недостаточно. Недоучет показателей геоэкологических опасных явлений, провоцирующих риски разрушения социально-экономического потенциала городов, в частности, повышение аварийности инженерно-технических сооружений и производств при нарушении амортизационных сроков их эксплуатации, а также бесконтрольно развивающихся геоэкологических процессов и стихийных природных явлений, снижает безопасность города. Планирование городской территории особенно при многоцелевом использовании земель должно базироваться на ее оценке не только по природным, но и по антропогенным, т.е. привнесенным деятельностью человека факторам.

В настоящий момент при стратегическом пространственном планировании городов все чаще предпочтение отдается мастер-планам. Однако следует отметить отсутствие определения мастер-плана в законодательстве градостроительной практики в России. В то же время они внедряются в целом ряде российских городов (Пермь, Якутск, Дербент, Владикавказ, Владивосток, Иркутск, Екатеринбург, Казань, Севастополь, Норильск, Астраханской агломерации) [2]. Отдельным блоком в мастер-плане стоит “городская среда”, для развития которой в качестве критерия определяются безопасность, разнообразие и комфортность, а среди приоритетов ее развития отдается предпочтение водно-зеленой сети за счет принятия модели устойчивой городской экосистемы.

Основное отличие мастер-плана от генплана заключается в том, что он является более гибким документом, позволяющим оперативно отвечать

⁴ Федеральный закон от 27.06.2019 № 151-ФЗ. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44384>

на запросы общества и изменяющиеся экономические или социальные условия. Кроме того, мастер-план, как и стратегия развития города, предусматривает наличие процесса вовлечения местного населения в его пространственное планирование и поиск оптимального решения при соблюдении интересов различных сторон. Однако в мастер-планах не учитываются риски возникновения и развития опасных геоэкологических процессов и явлений на территории города.

Многолетние исследования, проводимые ИГЭ РАН в области геоэкологии регионов и городов, позволили выявить, систематизировать и дать определения терминам, разработать методический подход к оценке геоэкологической безопасности городов, апробированный на примере 100 городов РФ с населением более 100 тыс. человек. В процессе исследований авторы постоянно сталкиваются со сложностью получения необходимой информации в связи с ее отсутствием в открытом доступе. К сожалению, на сегодня недостаточно разработаны механизмы сбора необходимых данных, многие из них вообще не существуют в официальной статистике, как и оценка эффективности их использования при планировании территории. Так, Росстат не отражает площадные данные о структуре землепользования городов, загрязнении городских почв, существующем состоянии геологической среды (ГС) и возможном проявлении опасных геоэкологических процессов.

Напрашивается вывод о необходимости формирования *геоэкологической БД городской территории, под которой понимается структурированная и упорядоченная совокупность геоэкологических данных, учитываемых при планировании городских территорий, управляемых централизованно.*

СТРУКТУРА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БД ГОРОДА

Территория города определяется как территория, объединенная единой пространственно-временной функцией, направленной на формирование условий жизнедеятельности проживающего на нем населения. К числу многочисленных экологических проблем относятся и геоэкологические, связанные с возникновением таких геоэкологических явлений, как, например, подтопление территории, активизация оползней и др., спровоцированных хозяйственной деятельностью человека.

Геоэкологический профиль города строится на основе существующей информации, систематизированной в тематическую базу данных (геоэкологическая БД). Цель формирования геоэкологической базы данных – предоставление оперативной информации для эффективного управления, планирования и проектирования городской террито-

рии. Сегодня наиболее распространенной задачей БД является система категории оперативной аналитической обработки данных и, в частности, система поддержки принятия решений, когда сведения БД в основном используются для выборки данных, необходимых для принятия наиболее эффективного решения.

В структуре предлагаемой БД выделяются три блока (рис. 1). Первый блок – общие данные, сосредоточенные в опубликованных источниках, существующих ИС и др., отражающие общую характеристику города, в частности, экологическое состояние городской среды. Он предназначен для определения рейтинговой оценки российских городов [7]. Второй блок – природные и техногенные данные, позволяющие выполнять геоэкологическую оценку городской территории. Структура остальных блоков отражена в обобщенном виде: указывается только вид представления информации и основные источники ее получения. Геоэкологическая информация структурирована по основным эколого-геологическим разделам. Собранные данные по каждому городу подвергаются анализу, позволяющему качественно оценить геоэкологическое состояние территории, а выполнение расчетов – провести количественную геоэкологическую ее оценку. В итоге могут быть получены рекомендации по оптимальности и эффективности планирования городской территории (см. рис. 1). Кроме того, эти данные должны стать отправной точкой для архитекторов, проектировщиков и администрации, иллюстрируя основные особенности взаимодействия между городским развитием и природной средой.

Таким образом, информационной основой для создания “геоэкологического профиля города” служат статистические данные, сведения экологического и геологического мониторингов, материалы ДДЗ, полевых исследований, материалы по экологическому обоснованию документов территориального планирования и градостроительного проектирования.

На основании анализа получаемых данных, которые имеют количественные или качественные характеристики, необходимо выявить природно-экологические индивидуальные характеристики, ограничения и риски (природные и техногенные) для освоения и планирования территории города, реконструкции застройки.

К задачам обеспечения государственной и общественной безопасности относится повышение эффективности мер по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Для городских территорий особую значимость приобретает геоэкологическая безопасность, поскольку горные породы (грунты) являются основанием фундаментов зданий и сооружений, вмещающей средой для под-

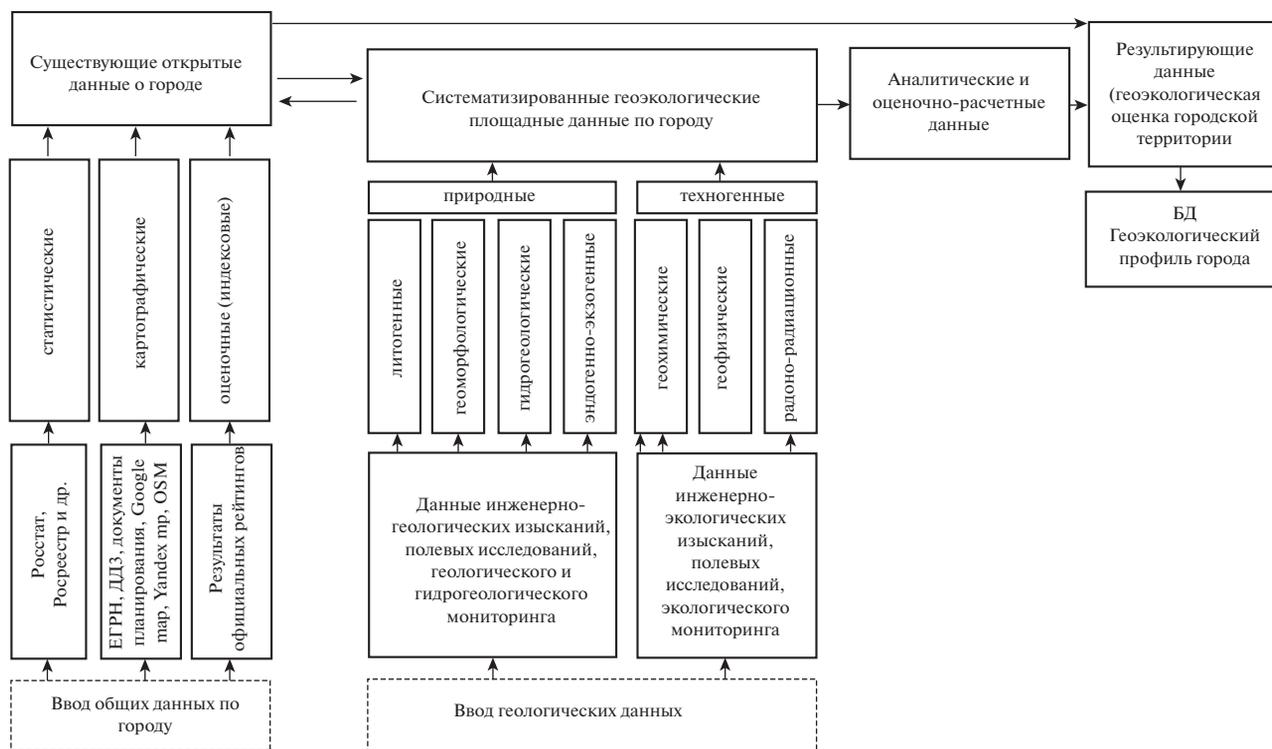


Рис. 1. Структура БД “Геоэкологический профиль города”.

земных сооружений и коммуникаций, а их естественная или спровоцированная деятельностью человека неустойчивость представляет определенную угрозу для городских объектов и человека. Геоэкологические условия городских территорий характеризуются исходным состоянием ГС, ее устойчивостью и степенью изменения под воздействием опасных геологических процессов, активизирующихся в результате повышенной техногенной нагрузки. Стабильность ГС, в первую очередь, определяется геодинамической активностью территории, геологическим строением, составом и физико-механическими свойствами грунтов и их обводненностью.

При планировании развития городских территорий необходимо учитывать экологические, включая геоэкологические, ограничения и регламентации использования городских пространств. Инженерно-геологические условия территорий определяют необходимые мероприятия по ее инженерной подготовке и решающим образом влияют на стоимость ее освоения. В первую очередь инженерно-геологические условия показывают пригодность территории для строительства. Однако такие данные, как уровень залегания подземных вод, подтопление, затопление, интенсивность и особенности экзогенных процессов, переработка берегов рек и водохранилищ и др., используются в оценке для рекреационных и других целей. Для города особо важен принцип взаимозависимости, ко-

гда необходимо учитывать взаимосвязь между всеми природными компонентами (литосфера, гидросфера, атмосфера) и технологиями производства, загрязнения и т.д., которые приводят к возникновению или обострению других негативных процессов.

Для большинства городов из числа опасных геоэкологических процессов характерно подтопление застроенной территории, а самыми значимыми по негативным последствиям будут стихийные природные процессы – землетрясения в городах, расположенных в сейсмоактивных зонах. Естественные геологические процессы развиваются в основном в пределах природных территорий города, под которыми понимаются не застраиваемые территории, в частности ООПТ, городские леса, парки, прибрежные зоны и др. с проявлением геоэкологических процессов. Такие территории, как правило, распространены на периферии городской застройки или на вновь присоединенных территориях в процессе преобразования городов в ГО. Это сезонно затапливаемые поймы рек, заболоченные площади или пораженные овражно-балочной сетью, оползнеопасные крутые склоны и подмываемые берега рек, водохранилищ и др.

Опираясь на разработанную ранее структуру геоэкологических процессов [3], ставились задачи установления важности геоэкологических показателей применительно к различным городским территориям и выявления зависимостей

между ними. Выбор городов для предварительного анализа осуществлялся согласно критерию их разнообразия по:

– местоположению (по административно-управленческому: города – представители всех ФО и многих субъектов РФ, и по природным особенностям);

– площадным параметрам (площади городов, ГО, природных территорий);

– обеспеченности исходной информацией о площадях пораженности геоэкологическими процессами.

Выбранные города (табл. 1) различаются как по размерам, так и числу жителей, большинство из них имеют статус ГО с увеличенной площадью за счет присоединения, в том числе природных территорий. Следует заметить, что значения площадей из открытых, но разных источников не всегда совпадают, что указывает на недостоверность данных в существующих ИС. Кроме площадных показателей учитывалась структура опасных процессов. Для сравнительного анализа городов в качестве количественного критерия оценки был выбран *потенциальный ущерб от проявления опасных процессов*. Определялись корреляционные связи между значениями городских площадей, их природными особенностями, характером землепользования и структурой геоэкологических процессов и величинами ущербов.

Установлена определенная закономерность между показателями площадей и потенциального ущерба: чем меньше площадь природных территорий, изменяющаяся по городам от <2% до >80%, тем выше удельная величина ущерба. По этому признаку города выборки были объединены в несколько групп.

Отметим, что для одной трети городов из рассмотренной выборки с долей природных площадей 50–80% превышение удельного значения ущерба на них относительно этой же величины для всей площади ГО меньше в 2 раза, тогда как для другой трети городов с долей природных площадей <20% это превышение доходит до 7 раз.

Существенные различия в параметрах и перечне учитываемых показателей затруднили установление тесных зависимостей между другими показателями. Это доказывает, что *геоэкологическая БД* будет индивидуальной для каждого города, так как слишком различны параметры городов, их природная особенность и антропогенное воздействие в каждом из них. Однако при создании интегральной БД для планирования городов в целях достижения достоверности и равноценного учета природных и техногенных особенностей территорий необходимо предусмотреть в ней максимально возможное разнообразие встречающихся в ГО геоэкологических процессов. Очевидно, определяющим является количество, сочета-

ние и соотношение учитываемых геоэкологических процессов. Это подтверждается превышением полученных значений потенциального суммарного ущерба по всей выборке за 2023 г. (учтено 8 процессов) над этим же показателем за 2019 г. (учтено 5 процессов), составившим 90%.

ЗАДАЧИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БД В ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ ГОРОДСКОЙ ТЕРРИТОРИИ

Суть эффективного государственного управления территориальным планированием заключается в создании города для человека. Последствиями неэффективной государственной политики и связанных с ней градостроительных ошибок могут стать чрезвычайные ситуации и огромные социально-экономические ущербы.

Наиболее распространенной мерой эффективности пространственной организации города является выбор пространственно-временной доступности видов деятельности, социальных контактов, благ и услуг. В таком случае к основным относятся показатели, характеризующие общественную застройку, интенсивность использования и популярность территорий, транспортную доступность, т.е. показатели *насыщенности и связности*. При таком подходе экологическая безопасность городской среды, включая геоэкологическую, учитывается только косвенно.

Основным критерием оптимальности выбранного варианта планирования городской территории является соблюдение принципов ее устойчивого развития. Оно базируется на равновесии между нормализацией экологической обстановки (в настоящее время, как правило, без учета геоэкологических условий) и социально-экономическими потребностями, рациональным природопользованием. Это является одним из главных требований к градостроительному развитию.

Цель внедрения геоэкологической БД в территориальное планирование городов – ускорить процесс планирования, повысить качество принимаемых решений за счет предотвращения или минимизации проявления опасных геоэкологических процессов.

Экономическая эффективность – это результативность деятельности, характеризуемая отношением полученного экономического результата к затратам, обусловившим получение этого результата. Поскольку планирование – это практическая деятельность, ориентирующаяся на результаты, но не являющаяся генератором прибыли сама по себе, возникает вопрос: как определить его эффективность и эффективность использования различных средств при планировании территории, в частности геоэкологической БД.

Таблица 1. Геолого-геоморфологическая характеристика городов выборки

№ провинции*	Краткая геолого-геоморфологическая характеристика физико-географических провинций**	Примеры городов выборки в физико-географической провинции	Опасные геоэкологические процессы, распространенные в городах
3	Возвышенная моренная равнина; известняки девона и карбона, пески и глины юры и мела	Ярославль, Орехово-Зуево, Калуга, Кострома, Иваново и др.	Подтопление, овражная эрозия, карст, оползни
7	Возвышенность; юрские, меловые (доломиты, известняки, мел) и четвертичные породы большой мощности	Нижний Новгород, Дзержинск, Набережные Челны, Саратов, Казань и др.	Подтопление, овражная эрозия, карст
11	Возвышенная равнина (до 300 м); известняки девона, юрские и меловые песчано-глинистые и меловые породы	Липец, Елец, Старый Оскол, Белгород, Курск и др.	Подтопление, суффозионно-карстовые процессы, овражная эрозия
15	Предгорный рельеф; известняки, песчаники	Ялта и др.	Сейсмические, оползневые и абразионные (морские) процессы
18	Низкогорный рельеф; палеозойские кристаллические породы, известняки, гипс	Челябинск, Екатеринбург, Нижний Тагил, Миасс, Орск и др.	Подтопление, карст
20	Волнисто-увалистые равнины; континентальные песчано-глинистые отложения, перекрытые лессом или лессовидными суглинками	Новокузнецк, Бийск, Барнаул и др.	Подтопление, овражная эрозия
21	Плоские слабопересеченные равнины; мезо-кайнозойские морские и континентальные песчано-глинистые отложения, перекрытые, выше по разрезу, четвертичными аллювиальными, водно-ледниковыми и озерно-аллювиальными глинами, суглинками и песками	Омск, Новосибирск, Бердск и др.	Заболачивание, подтопление, береговые процессы
22	Возвышенные эрозионные и плоские равнины; палеозойские и мезозойские породы, перекрытые, выше по разрезу, лессовидными суглинками и аллювиальными песками, глинами	Кемерово, Ачинск, Красноярск, Томск, Северск и др.	Подтопление, заболачивание
28	Горный плосковершинный рельеф; граниты и метаморфизованные породы архея, протерозоя и нижнего палеозоя	Улан-Удэ, Чита и др.	Сейсмичность до 8 баллов, подтопление, затопление
30	Низкогорья в сочетании с увалистыми и низменными равнинами; глинистые сланцы, песчаники, палеогеновые песчано-глинистые породы, перекрытые четвертичными аллювиальными и озерными отложениями	Хабаровск, Комсомольск-на-Амуре, Благовещенск и др.	Подтопление, затопление
31	Горный рельеф; мезозойские осадочные и вулканогенные породы и палеогеновые вулканогенные породы	Владивосток, Уссурийск и др.	Подтопление, эрозионное расчленение

*Всего в России выделено 33 провинции. **Источники: [1, 8].

Таблица 2. Ожидаемые эффекты от использования геоэкологической БД при территориальном планировании развития городов

Данные геоэкологической БД	Виды ожидаемого эффекта от геоэкологической БД в основных сферах		
	экономическая	социальная	экологическая
Сочетание и пораженность геоэкологическими процессами осваиваемой городской территории	Обоснование выбора альтернативных участков с минимальным количеством геоэкологических ограничений	Обеспечение устойчивости застраиваемой территории и формирование благоприятной окружающей среды	Сохранение территорий с естественным развитием процессов в природе
Прогноз развития геоэкологических процессов в зоне освоения	Выбор и обоснование природоохранных мероприятий	Обеспечение геоэкологической безопасности	Предотвращение негативного воздействия на природную среду при строительстве и эксплуатации объектов городской инфраструктуры

Оценка эффективности использования геоэкологической БД при планировании городских территорий может определяться разными способами:

– сокращение сроков решения задач планирования территории (снижение трудозатрат на планирование за счет сокращения времени на поиск соответствующих данных, отраженных в БД);

– оценка повышения индекса геоэкологической безопасности города за счет учета при планировании территории опасных процессов и достаточных средств (в т.ч. инвестиционных) на предупреждающие природоохранные меры;

– установление соотношения потерь и доходов при смене вида землепользования в городе, предусмотренного планированием территории, на основе данных кадастровой оценки земель в БД;

– определение отношения предотвращенного потенциального ущерба от опасных геоэкологических процессов, учтенных при планировании территории, и затрат на создание геоэкологической БД;

– сопоставление планируемых средств на охрану окружающей среды (с разбивкой по отдельным видам) и потенциального ущерба от опасных геоэкологических процессов, не предусмотренных рассматриваемым вариантом плана;

– представление эффективности качественной характеристикой.

В общем виде возможные эффекты от использования геоэкологической БД представлены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Территориальное планирование и дальнейшая стратегия развития города зависят от существующей социально-экономической ситуации, состояния инфраструктуры, промышленных мощностей и рынка труда, перспектив привлечения инвести-

ций. К сожалению, в документах территориального планирования недостаточное внимание уделяется экологическим проблемам городов, а геоэкологические практически не рассматриваются.

Сведения БД об опасных геоэкологических процессах и объектах на территории ГО позволят обратить на них внимание, определить вероятность их проявления и предусмотреть предупреждающие меры, что в итоге обеспечит эффективное планирование развития города.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № г.р. 122022400104-2 “Техногенез и природа: геоэкологические проблемы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И.* Физическая география СССР. Азиатская часть: Учеб. для студентов геогр. фак. ун-тов. М.: Мысль, 1978. 512 с.
2. *Герцберг Л.Я.* Является ли мастер-план эффективным инструментом развития территорий в России? // Архитектура и строительство. 2023. № 2. <https://cyberleninka.ru/article/n/yavlyatsya-li-master-plan-effektivnym-instrumentom-razvitiya-territoriy-v-rossii> (дата обращения 26.07.2023).
3. *Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е.В.* Геоэкологические процессы в городе и оценка их опасности // Геоэкология. 2022. № 3. С. 82–96. <https://doi.org/10.31857/S0869780922030109>
4. *Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е.В., Сависько И.С.* Геоэкологические ограничения при проектировании реорганизации городского пространства // Геоэкология. 2017. № 4. С. 82–96.
5. *Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Сависько И.С., Молдавская Л.У.* Геоэкологический фактор и эффективность проектных решений // Геоэкология. 2015. № 4. С. 377–384.
6. Методология разработки плана действий “Зеленый город” 2020. 72 с. <https://www.ebrdgreencities.com>. (дата обращения 26.07.2023).

7. Рейтинг Устойчивого развития городов России, 2020. <https://www.agencysgm.com/upload/iblock/513/51385c0f0ec17be0a989b7f371e928ca.pdf> (дата обращения 26.07.2023).
8. Физическая география СССР: общий обзор. Европейская часть СССР. Кавказ / Ф.Н. Мильков, Н.А. Гвоздецкий. Изд. 4-е, испр. и доп. М.: Мысль, 1976. 448 с.
9. Smart City Urban Digitalization Project. <https://minstroyrf.gov.ru/trades/gorodskaya-sreda/proekt-tsifrovizatsii-gorodskogo-khozyaystva-umnyy-gorod/> (дата обращения 26.07.2023).

GEOENVIRONMENTAL PROFILE OF A CITY FOR EFFECTIVE URBAN PLANNING

V. G. Zaikanov^{a,#}, T. B. Minakova^a, and E. V. Buldakova^a

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

[#]*E-mail: v.zaikanov@mail.ru*

The article discusses modern approaches to planning urban areas in the context of implementing the Federal Project “Formation of a comfortable urban environment”. It is proposed to create a “geoenvironmental profile of the city” for the system integration of heterogeneous information about the city and geoenvironmental processes, which often limit the development of urban space. The formation of such a profile will allow integrating geoenvironmental data into strategic documents of territorial development and planning urban areas. This will contribute to effective planning to achieve sustainable and safe urban development.

Keywords: *geoenvironmental profile of the city, geoenvironmental data, master plan, efficiency planning, information systems*

REFERENCES

1. Gvozdetskiy, N.A., Mikhailov, N.I. [Physical geography of the USSR. Asian part]. Moscow, Mysl' Publ., 1978, 512 p. (in Russian)
2. Gertzberg, L.Ya. [Is the master plan an effective tool for the development of territories in Russia?]. *Arkhitektura i stroitel'stvo*, 2023, no. 2. (accessed: 26/07/2023). (in Russian)
3. Zaikanov, V.G., Minakova, T.B., Buldakova, E.V. [Geoenvironmental processes in the city and their hazard assessment]. *Geoekologiya*, 2022, no. 3, pp. 82–96. (in Russian)
4. Zaikanov, V.G., Minakova, T.B., Buldakova, E.V., Savis'ko, I.S. [Geoenvironmental constraints in the design of urban space rearrangement]. *Geoekologiya*, 2017, no. 4, pp. 82–96. (in Russian)
5. Zaikanov, V.G., Minakova, T.B., Savis'ko, I.S., Moldavskaya, L.U. [Geoecological factor and efficiency of design solutions]. *Geoekologiya*, 2015, no. 4, pp. 377–384. (in Russian)
6. [Methodology for the development of the Green City action plan]. 2020, 72 p. <https://www.ebrdgreencities.com>. (accessed: 26/07/2023). (in Russian)
7. [Rating of sustainable development of Russian cities, 2020]. <https://www.agencysgm.com/upload/iblock/513/51385c0f0ec17be0a989b7f371e928ca.pdf> (accessed: 07/29/2022). (in Russian)
8. [Physical geography of the USSR: a general overview. The European part of the USSR. Caucasus]. F.N. Mil'kov, N.A. Gvozdetskiy, Eds. Moscow, Mysl' Publ., 1976, 448 p. (in Russian)
9. Smart City Urban Digitalization Project. <https://minstroyrf.gov.ru/trades/gorodskaya-sreda/proekt-tsifrovizatsii-gorodskogo-khozyaystva-umnyy-gorod/> (accessed: 26/07/2023).

**МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА
ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 504.064.2.001.18

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХРОМА
И МАРГАНЦА В ПОЧВЕ: ПОДБОР ОБУЧАЮЩЕГО ПОДМНОЖЕСТВА**

© 2023 г. А. С. Буторова^{1,2,*}, А. В. Шичкин^{1,**}, А. П. Сергеев^{1,***},
Е. М. Баглаева^{1,****}, А. Г. Бувич^{1,*****}

¹Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (ИПЭ УрО РАН),
ул. С. Ковалевской 20, Екатеринбург, 620990 Россия

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(ФГАОУ ВО “УрФУ им. Б.Н. Ельцина”),
ул. Мира 19, Екатеринбург, 620002 Россия

*E-mail: a.s.butorova@urfu.ru

**E-mail: and@ecko.uran.ru

***E-mail: sergeev@ecko.uran.ru

****E-mail: e.m.baglaeva@urfu.ru

*****E-mail: bag@ecko.uran.ru

Поступила в редакцию 05.06.2023 г.

После доработки 28.07.2023 г.

Принята к публикации 08.09.2023 г.

Выбор метода разбиения исходных данных на обучающее и тестовое подмножества в моделях на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) — недостаточно изученная проблема непрерывной интерполяции пространственно-временного поля. В частности, выбор наилучшего обучающего подмножества для моделирования пространственного распределения элементов в верхнем слое почвы — нетривиальная задача, поскольку точки отбора проб не эквивалентны. Они содержат разное количество “информации” в каждой конкретной модели, поэтому при моделировании целесообразно задействовать большинство точек, содержащих “полезную” для этой модели информацию. Неправильное разбиение данных может привести к неточным и чрезвычайно изменчивым характеристикам модели, высокой дисперсии и систематической ошибке в сгенерированных результатах. В качестве исходных данных были взяты данные о содержании хрома (Cr) и марганца (Mn) в верхнем слое почвы жилых районов в г. Ноябрьск (субарктическая зона России). Разработан трехэтапный алгоритм извлечения исходных данных с разбиением на обучающее и тестовое подмножества для моделирования пространственного распределения этих тяжелых металлов (ТМ). Для построения модели пространственного распределения содержания ТМ в верхнем слое почвы использовался многослойный перцептрон (MLP), который учитывал пространственную неоднородность и правила обучения. Структура MLP была выбрана путем минимизации среднеквадратичной ошибки. Все точки разделились на три класса: “полезные”, “обычные” и “бесполезные”, по количеству попаданий в обучающее подмножество. Учет этой информации на этапе разбиения исходных данных позволяет повысить точность прогностической модели.

Ключевые слова: моделирование, искусственные нейронные сети, обучающее подмножество, почва, тяжелые металлы

DOI: 10.31857/S0869780923050028, **EDN:** ZZZEIKY

ВВЕДЕНИЕ

Искусственные нейронные сети (ИНС) становятся все более востребованными для изучения пространственного распределения какого-либо признака. Модели на основе ИНС обеспечивают приемлемую точность при моделировании сложных экологических задач [2, 14, 17, 20, 21]. Прогностическая точность, достигаемая с помощью ИНС, часто выше, чем у других методов [1, 8, 18, 25].

Особенно важно прогнозирование пространственного распределения признака в свете растущих темпов изменения климата, которые прояв-

ляются в арктических и субарктических регионах планеты [6, 24]. Точные прогнозы позволяют обществу более эффективно реагировать на вероятное негативное воздействие грядущих изменений.

Методы повышения точности прогнозов могут касаться как улучшения самих моделей ИНС (выбора типа и архитектуры, обучающих алгоритмов, создания гибридных моделей и т.д.), так и работы с исходными данными. Для моделирования необходимо разбить пространственно расположенную выборку на обучающее и тестовое подмножества с учетом вида исходных данных [10, 16, 26].

Выбор способа разбиения исходных данных на обучающее и тестовое подмножества в моделях ИНС – это проблема непрерывной интерполяции пространственно-временного поля, которая изучена недостаточно [9]. Данные, полученные в ходе мониторинга (скрининга) для оценки уровня загрязнения окружающей среды в неконтролируемых местах, зачастую не могут быть отобраны по равномерной сетке. Это связано со значительными различиями в характеристиках этих мест (перепадом высот, различными типами почв, городскими воздействиями и др.). Кроме того, точки отбора проб не эквивалентны для определения закономерностей распределения содержания элементов в верхнем слое почвы. Ошибки и выбросы, присутствующие в распределении, могут привести к погрешностям.

Методология разбиения данных оказывает значительное влияние на качество подмножеств, которые используются для обучения и тестирования ИНС. Некорректное разбиение данных может привести к неточным и чрезвычайно изменчивым характеристикам модели, высокой дисперсии и систематической ошибке в сгенерированных результатах. Статистический анализ результатов показывает, что такое разбиение данных может привести к снижению прогностической эффективности модели [23, 26]. Однако разработчики моделей ИНС редко уделяют должное внимание подбору методологии выборки [7].

В этой статье обсуждается разбиение исходных данных на основе статистического подсчета попаданий точек, включенных в обучающее подмножество. Такой подход позволяет исследовате-

лю учитывать структуру исходных данных. Разделение входных данных на N неперекрывающихся подмножеств, многократное обучение на $N-1$ подмножествах и тестирование на исключенном подмножестве, так называемая перекрестная проверка, часто используются для оценки производительности алгоритма обучения [9, 15]. Повторяющееся разбиение позволит получить статистическое распределение попаданий каждой точки в обучающее подмножество.

Цель работы – создание алгоритма определения наиболее полезных точек для включения в обучающее подмножество для задач интерполяции с помощью многослойного персептрона для моделирования содержания Cg и Mn в верхнем слое почвы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Место отбора проб

Обследование почв было проведено в жилых зонах субарктического г. Ноябрьск (Ямало-Ненецкий автономный округ, Россия (рис. 1)). Это территория, расположенная севернее 60-й северной параллели. Ноябрьск находится на водоразделе двух крупнейших рек Сибири (Обь и Пур) в природной зоне тайги, в окружении множества небольших озер, рек и болот. Это один из самых молодых городов России, основанный в 1976 г.

Основная промышленность города – добыча углеводородов. Этот регион является субарктическим климатическим районом (Dfc по климатической классификации Кеппена). Район расположен в зоне распространения многолетнемерз-

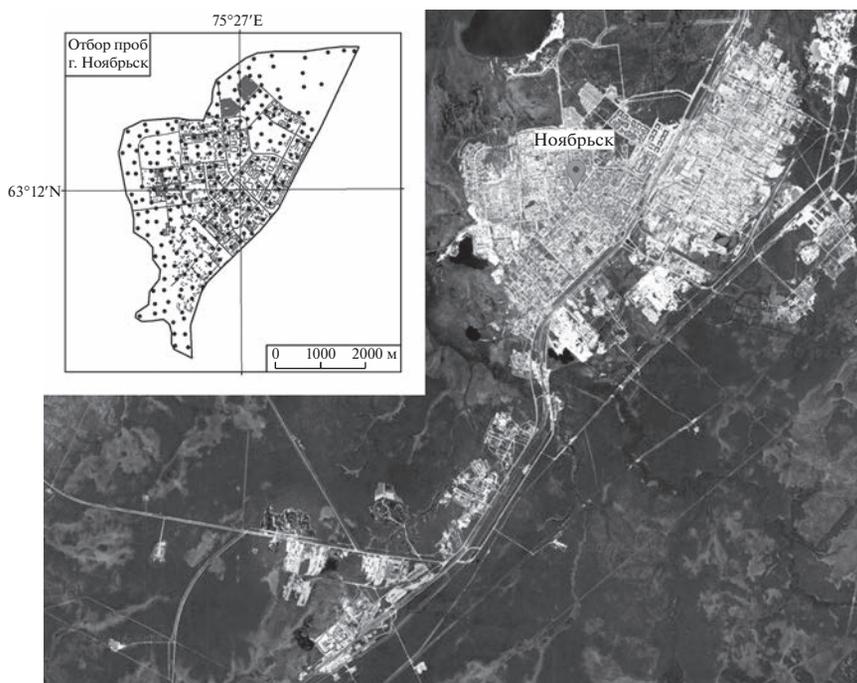


Рис. 1. Место отбора проб.

Таблица 1. Характеристики места отбора проб (жилая зона)

Место	Координаты	Количество образцов почвы	Тип почвы [4]	Текстура почвы	Тип почвы по FAO/UNESCO
Ноябрьск	63.2° N, 75.5° E	237	Глеевая таежная	100% песок	Gd 23-1ab

лых пород. Характеристики места отбора проб приведены в табл. 1.

Отбор проб почвы и химический анализ

Для исследований отбирался верхний слой урбанизированной почвы на глубине 0.05 м. Отбор проб почвы производился на нетронутых участках в узлах квадратной сетки с шагом 250 м. Их фактические географические координаты определились при отборе проб непосредственно на местности. Семь кернов были взяты на площади $1 \times 1 \text{ м}^2$ с помощью пробоотборника из нержавеющей стали с внутренним диаметром 0.05 м и упакованы в двойные полиэтиленовые мешки. Внутренний пакет был промаркирован идентификатором образца. Масса каждого высушенного образца составляла примерно 1 кг [7]. Образцы почвы были доставлены в сертифицированную лабораторию в соответствии со стандартом ISO/IEC 17025:2005.

Подготовка и химический анализ проводились в соответствии с действующими нормативными требованиями Федеральной системы сертификации РФ. Подготовка образцов почвы заключалась в сушке на воздухе при стандартных условиях, просеивании через сито 1 мм, разделении на четвертины и гомогенизации до 20-граммовых дополнительных образцов и измельчении до зерен диаметром 0.074 мм.

Общее содержание Si, K, Ca, V, Cr, Mn, Ni, Cu и Zn в образцах почвы было проанализировано с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS); прибор представлял собой Perkin Elmer ELAN 9000 с пределом обнаружения 0.1 мг/кг для каждого элемента. Перед анализом образцы почвы растворялись концентрированной азотной и плавиковой кислотой. После перемешивания и нагревания до 95°C раствор обрабатывался концентрированной хлорной кислотой и после охлаждения обрабатывался соляной кислотой при медленном нагревании в течение 30 мин. После охлаждения раствор был разбавлен до 50 мл деионизированной водой, тщательно перемешан и помещен в полиэтиленовый флакон. Содержание Cr и Mn использовалось в качестве исходных данных для моделирования.

Алгоритм разбиения

Алгоритм разбиения исходных данных состоял из трех шагов (рис. 2):

1. Набор исходных данных был 1000 раз случайным образом разбит на обучающее и тестовое подмножества в соотношении 70% к 30% соответственно. Таким образом, были получены 1000 разбиений на два непересекающихся множества.

2. Было построено 1000 сетей для каждого случайного обучающего подмножества. Для каждой обученной сети определялась среднеквадратичная ошибка (RMSE) предсказания тестового подмножества.

3. Для этого этапа было отобрано 100 сетей (10% от общего числа 0.1-квантилей) с наименьшим значением RMSE. Частоты попадания в обучающее подмножество рассчитывались суммированием попаданий каждой точки пространства по выбранным сетям. Точки, для которых частота совпадений в обучающем подмножестве превышала 75%, выбирались для включения в обучающее подмножество.

Построение MLP

Для тестирования производительности нового метода потребовалась простая в использовании настраиваемая модель искусственной нейронной сети. Многослойный перцептрон (MLP) с алгоритмом обучения Левенберга-Маркварта [12] был выбран в качестве эталонной модели ИНС. Эта простая и легкая в обучении сеть отлично зарекомендовала себя в прогнозировании пространственного распределения. Использование предложенной методики извлечения обучающего подмножества актуально для всех моделей, прогнозирующих пространственное распределение признака.

Построение модели MLP заключалось в подборе параметров: количества скрытых слоев и количества нейронов внутри каждого скрытого слоя. В процессе обучения MLP связи между нейронами, устанавливаемые путем присвоения весов, обновляют значения веса и смещения в соответствии с функцией потерь как наименьшей суммы квадратов ошибок в обучающем подмножестве (алгоритм обучения Левенберга-Маркварта).

1. Структура MLP была выбрана компьютерным моделированием на основе минимизации RMSE. Входной слой MLP состоял из двух нейронов (пространственные координаты точек на территории Ноябрьска x и y). MLP имел один скрытый слой с числом нейронов от 2 до 20. Выходной слой MLP включал один нейрон (содержание химического элемента).

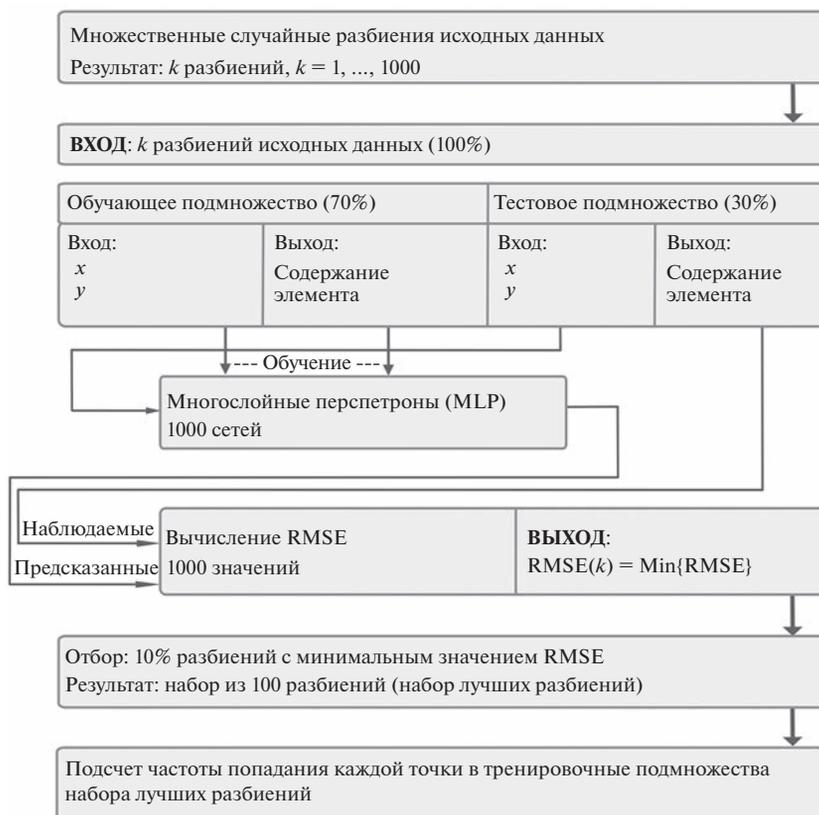


Рис. 2. Блок-схема алгоритма разбиения.

2. Каждая сеть (1000 сетей, как показано на рис. 2) имела структуру с соответствующим количеством нейронов в скрытом слое и была обучена 500 раз. Затем выбиралась лучшая из них (с минимальным среднеквадратичным отклонением для каждого числа нейронов).

3. Структура сети MLP с определением оптимального количества нейронов в скрытом слое для каждой области.

Оценка точности модели

Для оценки точности прогноза между прогнозируемым и исходным наборами данных используются MAE (1) и RMSE (2):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |p_i(x) - o_i(x)|}{n}, \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i(x) - o_i(x))^2}{n}}, \tag{2}$$

где $p_i(x)$ и $o_i(x)$ – прогнозируемая и наблюдаемая концентрация соответственно, n – количество точек.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Описательные статистики содержания Cr и Mn обследованной территории представлены в табл. 2. Сравнивалось содержание фоновых элементов в почвах в Уральском регионе (Ural Clarke) и в мире (World Clarke). Суммарное содержание Cr на городском фоне не превышает контрольных значений, а общее содержание Cr в зонах аномалий в несколько раз превышает Ural Clarke [3, 5]. Общее содержание Cr в подзолах,

Таблица 2. Описательные статистики исходных данных

Место	Элемент	Содержание, мг/кг			Коэффициент вариации, %	Асимметрия	Экссесс	p-уровень Шапиро–Уилка
		Min–Max Среднее	Стандартное отклонение	Медиана				
Ноябрьск	Cr	17 – 140 63	23	60	37	0.8	0.6	<0.05
	Mn	62 – 529 141	56	130	40	3.8	20.8	<0.05

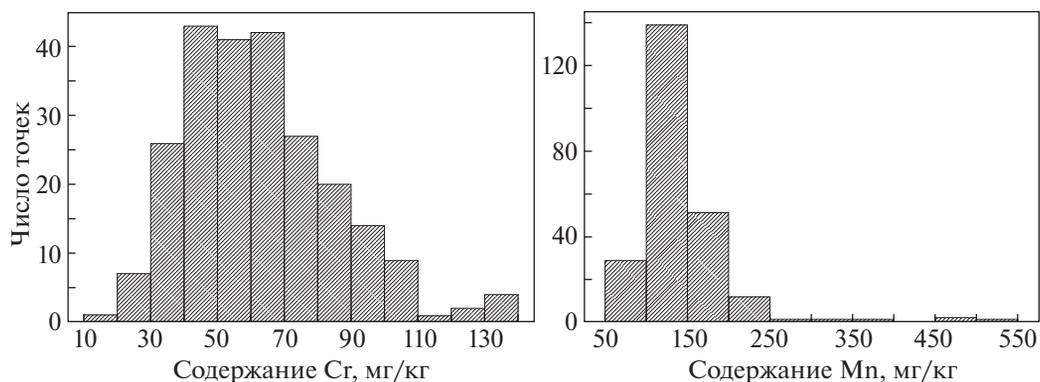


Рис. 3. Гистограмма содержания элементов.

как известно, находится в диапазоне от 2.6 до 34 мг/кг в Канаде [11], от 3 до 200 мг/кг в США [19], от 18 до 25 мг/кг в России [13]. Известно, что общее содержание Mn в подзолах находится в диапазоне от 7 до 2000 мг/кг в США и от 135 до 310 мг/кг в России [13]. Общее содержание Mn не превышает контрольных средних значений 545 мг/кг [13] в мире или 580 мг/кг в России [22].

Согласно данным, представленным в табл. 2, распределение вероятностей содержаний элементов имеет тяжелый правый хвост. Высокий коэффициент эксцесса для Mn указывает на выбросы (рис. 3).

Содержание Cr имеет одномодальное распределение (см. рис. 3). Содержание Mn имеет правый хвост. Тест Шапиро–Уилка показал, что распределение содержания Cr и Mn статистически значимо отличается от нормального ($p < 0.05$).

Был определен лучший набор образцов почвы для обучающего подмножества для прогнозирования содержания элементов в тестовом подмножестве с минимальной среднеквадратической ошибкой. Скрытые слои состояли из восьми нейронов. Окончательная структура модели MLP составила 2-8-1 для каждого элемента.

В табл. 3 приведены основные результаты распределения ошибок полученных моделей для обследованной территории. Распределения RMSE и MAE унимодальные и симметричные с низкими

коэффициентами вариации. Тест Шапиро–Уилка показал, что полученные распределения RMSE статистически значимо отличаются от нормального ($p = 0.0005$) для содержания Mn и не отличаются от нормального для содержания Cr с $p > 0.52$. Жирным шрифтом в табл. 3 выделены лучшие значения ошибок: это RMSE для моделей Cr. Распределения соответствующих элементов симметричны и унимодальны, хотя и отличаются от нормальных. Минимум (Min) и максимум (Max) для RMSE и MAE в табл. 3 показывают точность между прогнозом и исходными данными с единичным разбиением данных. Включение наиболее многообещающих точек с точки зрения частоты попаданий в обучающий набор для задач интерполяции многослойным перцептроном содержания элементов в верхнем слое почвы повышает точность прогноза.

Гистограмма RMSE моделирования содержания элемента показана на рис. 4. Пунктирные 0.1-квантильные значения на рис. 4 меньше средних значений для каждого элемента.

На рис. 5 показано пространственное расположение точек обучающего подмножества для визуализации полученных результатов. Совпадающие для двух элементов точки отбора проб составляют около 9% (22 точки) от общего числа точек. Чем больше наблюдается особенностей содержа-

Таблица 3. Оценка точности

Точность оценки	Элемент	Содержание, мг/кг			Коэффициент вариации, %	Асимметрия	Эксцесс	p -уровень Шапиро–Уилка
		min–max Среднее	Медиана	Стандартное отклонение				
MAE	Cr	12 – 20 16	16	1	8	0.14	–0.07	0.20
	Mn	27 – 80 58	58	7	12	–0.61	0.73	<0.05
RMSE	Cr	15 – 27 21	21	2	9	0.04	–0.21	0.52
	Mn	33 – 84 64	64	6	10	–0.80	1.48	<0.05

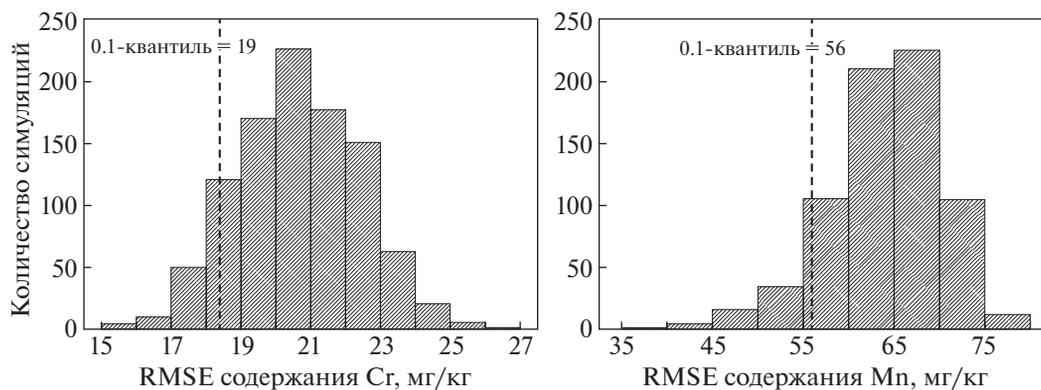


Рис. 4. Гистограмма RMSE моделирования содержания элемента.

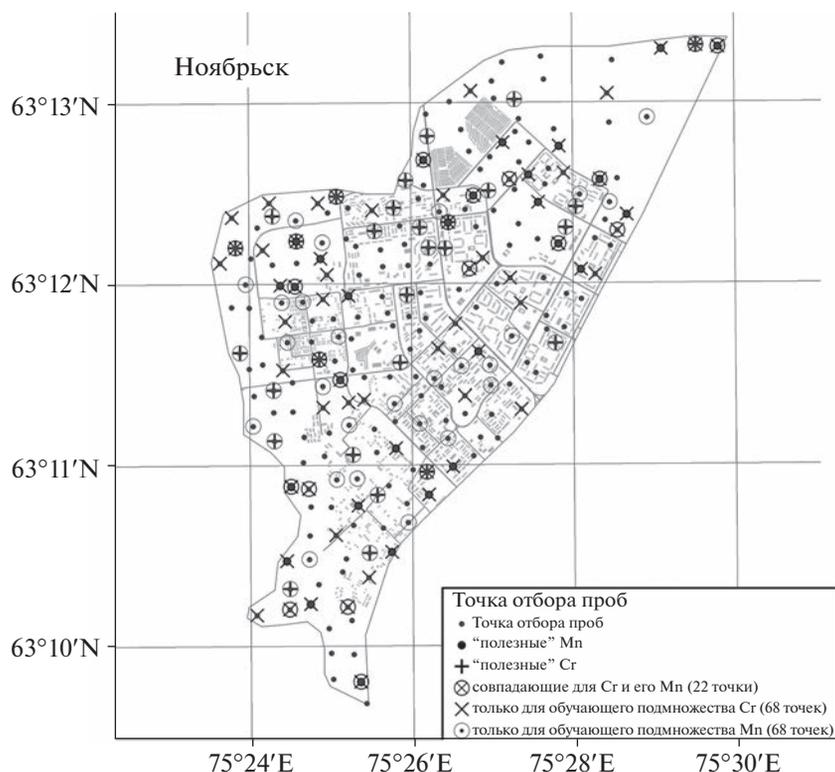


Рис. 5. Пространственное расположение обучающего подмножества для г. Ноябрьск.

ния территориального элемента, тем больше совпадающих точек выборки можно выделить при построении нейронной сети.

В финальное обучающее подмножество чаще всего входят граничные точки и точки, учитывающие территориальные особенности, например, морфологию места съемки, расположение улиц и т.д. В тестовое подмножество входят оставшиеся 30% точек.

Элементный состав однородный, без аномалий. Репрезентативность точек отбора проб практически такая же. Все точки имеют равные шансы попасть в обучающее подмножество.

Если существует правило пространственного распределения по области для содержимого эле-

мента, то оценка количества попаданий точки в обучающее подмножество может определить полезность каждой точки для обучения. На рис. 6 показано распределение попаданий точек выборки в обучающее подмножество для оценки репрезентативности каждой из них. Для каждого элемента по количеству попаданий в обучающее подмножество точки делятся на три класса: “полезные”, “обычные” и “бесполезные”.

“Полезные” точки — это точки, сформировавшие правило пространственного распределения. “Обычный” класс — это равные точки без особенностей. Равномерное распределение элемента в почве означает практически полное отсутствие “полезных” и “бесполезных” точек. “Бесполез-

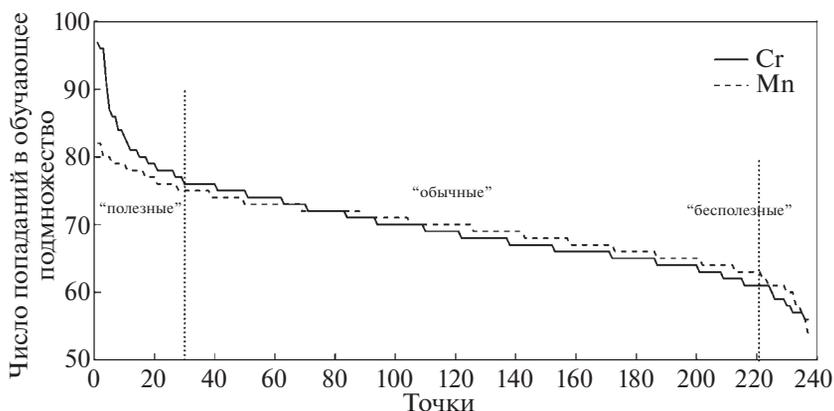


Рис. 6. Оценка репрезентативности точек выборки для обучающего подмножества.

ные” точки содержат существенную ошибку или недостаток некоторой информации об изучаемом явлении или процессе, что сводит на нет ее ценность для модели интерполяции. Они являются своего рода репрезентативными выбросами для данной территории.

Модель MLP, основанная на методе контролируемого разбиения, оказалась более точной, чем случайное разбиение [1]. Однако контролируемое разбиение требует предварительного знания распределения признака. Использование алгоритма, представленного в данной работе, не требует априорной информации о репрезентативности точек. Точность между наборами прогнозируемых и исходных данных этого метода оказалась не ниже, чем у метода контролируемого разбиения на все элементы. Недостатком метода является большой объем вычислений, необходимых для построения модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Точность интерполяции экологических данных преимущественно связана с предварительной подготовкой исходных данных для моделирования. В этом исследовании выполняется разбиение исходных данных для обучающего подмножества так, чтобы учесть частоту попадания каждой точки в те модели, для которых ошибки были минимальными. Искусственная нейронная сеть показала лучшую точность на данных с унимодальными характеристиками.

По количеству попаданий в обучающее подмножество для каждой территории выделяются “полезные”, “обычные” и “бесполезные” точки. “Полезные” точки должны быть включены в обучающее подмножество для повышения точности модели ИНС, а “бесполезные” — нет.

В последующих работах авторы планируют усовершенствовать предложенный подход и намерены подтвердить преимущества описанной методики извлечения обучающей выборки при моделировании пространственного распределения

химических элементов в верхнем слое почвы на примере других урбанизированных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бувич А.Г., Субботина И.Е., Шичкин А.В. и др. Оценка пространственного распределения хрома в субарктическом Ноябрьске с использованием кокригинга, генерализованной регрессионной нейронной сети, многослойного перцептрона и гибридной техники // *Геоэкология*. 2019. № 2. С. 77–86.
2. Буторова А.С., Сергеев А.П., Шичкин А.В. и др. Метод встречного прогнозирования пространственного ряда на примере содержания пыли в снеговом покрове // *Геоинформатика*. 2022. № 1. С. 32–39.
3. Войткевич Г.В., Мирошников А.Е., Поваренных А.С., Прохоров В.Г. Краткий справочник по геохимии. М.: Недра, 1977. 184 с.
4. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, Изд-во “КолосС”, 2004. 460 с.
5. Сает Ю.Е. Геохимия окружающей среды [Кол. авт.: Ю.Е. Сает, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др.]. М.: Недра, 1990. С. 84–108.
6. AMAP. Snow, Water, Ice and Permafrost. Summary for Policy-makers / Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway. 2017. 20 p.
7. Baglaeva E.M., Sergeev A.P., Shichkin A.V., Buevich A.G. The Effect of Splitting of Raw Data into Training and Test Subsets on the Accuracy of Predicting Spatial Distribution by a Multilayer Perceptron // *Mathematical Geosciences*. 2020. V. 52. P. 111–121.
8. Dai F., Zhoua O., Lva Z., Wang X., Liu G. Spatial prediction of soil organic matter content integrating artificial neural network and ordinary kriging in Tibetan Plateau // *Ecological Indicators*. 2014. V. 45. P. 184–194.
9. Demyanov V., Gloaguen E., Kanevski M. A special issue on data science for geosciences // *Mathematical Geosciences*. 2020. V. 52. P. 1–3.
10. Fernandez J.M., Mayerle R. Sample selection via angular distance in the space of the arguments of an artificial neural network // *Computers and Geosciences*. 2018. V. 114. P. 98–106.

11. Frank R., Ishida K., Suda P. Metals in agricultural soils of Ontario // Canadian Journal of Soil Science. 1976. V. 56. P. 181–196.
12. Goovaerts P. Geostatistics in soil science: State of the art and perspectives // Geoderma. 1999. V. 89. P. 1–45.
13. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants / Taylor and Francis Group CRC Press. 2011. P. 201–260.
14. Liodakis S., Kyriakidis P., Gaganis P. Conditional Latin Hypercube Simulation of (Log)Gaussian Random Fields // Mathematical Geosciences. 2018. V. 50. P. 127–146.
15. Malof J.M., Reichman D., Collins L.M. How do we choose the best model? The impact of cross-validation design on model evaluation for buried threat detection in ground penetrating radar / Материалы конференции Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXIII. 2018. V. 10628. 106280C.
16. Nath A., Subbiah K. The role of pertinently diversified and balanced training as well as testing data sets in achieving the true performance of classifiers in predicting the antifreeze proteins // Neurocomputing. 2018. V. 272. P. 294–305.
17. Sakizadeh M., Mirzaei R., Ghorbani H. Support vector machine and artificial neural network to model soil pollution: a case study in Semnan Province, Iran // Neural Computing & Applications. 2017. V. 28. P. 3229–3238.
18. Sergeev A.P., Buevich A.G., Baglaeva E.M., Shichkin A.V. Combining spatial autocorrelation with machine learning increases prediction accuracy of soil heavy metals // Catena. 2019. V. 174. P. 425–435.
19. Shacklette H.T., Boerngen J.G. Element concentrations in soils and other surficial materials of the conterminous United States / U.S. Geological Survey professional paper // United states government printing office, Washington. 1984. 105 p.
20. Shaker R.R., Ehlinger T.J. Exploring non-linear relationships between landscape and aquatic ecological condition in southern Wisconsin: A GWR and ANN approach // International Journal of Applied Geospatial Research. 2014. V. 5(4). P. 1–20.
21. Sun C., Liu J., Wang Y., Sun L., Yu H. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China // Chemosphere. 2013. V. 92 (5). P. 517–523.
22. Timofeeva Y.O., Kosheleva Y., Semal V., Burdukovskii M. Origin, baseline contents, and vertical distribution of selected trace lithophile elements in soils from nature reserves, Russian Far East // Journal of Soils and Sediments. 2018. V. 18 (3). P. 968–982.
23. Wieland R., Mirschel W., Zbell B., et al. A new library to combine artificial neural networks and support vector machines with statistics and a database engine for application in environmental modeling // Environmental Modelling & Software. 2012. V. 25. P. 412–420.
24. WMO. The Global Climate in 2015–2019 // World Meteorological Organization (WMO-№ 1249), Geneva, Switzerland. 2020. 24 p.
25. Worsham L., Markewitz D., Nibbelink N. Incorporating spatial dependence into estimates of soil carbon contents under different land covers // Soil Science Society of America Journal. 2010. V. 74. P. 635–646.
26. Ziggah Y.Y., Youjian H., Tierra A.R., Laari P.B. Coordinate Transformation between Global and Local Data Based on Artificial Neural Network with K-Fold Cross-Validation in Ghana // Earth Sciences Research Journal. 2019. V. 23 (1). P. 67–77.

MODELING OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF CHROME AND MANGANESE IN SOIL: SELECTION OF A TRAINING SUBSET

A. S. Butorova^{a,b,#}, A. V. Shichkin^{a,##}, A. P. Sergeev^{a,###}, E. M. Baglaeva^{a,####}, and A. G. Buevich^{a,#####}

^a*Institute of Industrial Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. S.Kovalevskoi 20, Yekaterinburg, 620990 Russia*

^b*Ural Federal University,
ul. Mira 19, Yekaterinburg, 620002 Russia*

[#]*E-mail: a.s.butorova@urfu.ru*

^{##}*E-mail: and@ecko.uran.ru*

^{###}*E-mail: sergeev@ecko.uran.ru*

^{####}*E-mail: e.m.baglaeva@urfu.ru*

^{#####}*E-mail: bag@ecko.uran.ru*

The selection of a method for dividing the raw data into training and test subsets in models based on artificial neural networks (ANN) is an insufficiently studied problem of continuous space-time field interpolation. In particular, selecting the best training subset for modeling the spatial distribution of elements in the topsoil is not a trivial task, since the sampling points are not equivalent. They contain a different amount of “information” in point of each specific model, therefore, when modeling, it is advisable to use most of the points containing information which is “useful” for this model. Incorrect data division may lead to inaccurate and highly variable model characteristics, high variance and bias in the generated results. The raw data included contents of chromium (Cr) and manganese (Mn) in the topsoil in residential areas of Noyabrsk (a city in Russian subarctic zone). A three-stage algorithm for extracting raw data with a division into training and test subsets has been developed for modeling the spatial distribution of heavy metals. According to the algorithm, the ini-

tial data set was randomly divided into training and test subsets. For each training subset, an ANN based on multilayer perceptron (MLP) was built and trained. MLP was used to model the spatial distribution of heavy metals in the upper soil layer, which took into account spatial heterogeneity and learning rules. The MLP structure was chosen by minimizing the root mean square error (RMSE). The networks with the lowest RMSE were selected, and the number of hits into the training subset of each point in space was calculated. By the number of hits in the training subset, all points were divided into three classes: “useful”, “ordinary” and “useless”. Taking this information into account, at the stage of the raw data division it is possible to increase the accuracy of the predictive model.

Keywords: modeling, artificial neural networks, training subset, soil, heavy metals

REFERENCES

- Buevich, A.G., Subbotina, I.E., Shichkin, A.V., et al. [Assessment of chrome distribution in subarctic Noyabrsk using co-kriging, generalized regression neural network, multilayer perceptron, and hybrid technics]. *Geoekologiya*, 2019, no. 2, pp. 77–86. (in Russian)
- Butorova, A.S., Sergeev, A.P., Shichkin, A.V., et al. [Counter-prediction method of the spatial series on the example of the dust content in the snow cover]. *Geoinformatika*, 2022, no. 1, pp. 32–39. (in Russian)
- Voitkevich, G.V., Miroshnikov, A.E., Povarennykh, A.S., Prokhorov, V.G. [The short manual in geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1977, 184 p. (in Russian)
- Dobrovolskii, G.V., Urusevskaya, I.S. [Soil geography]. Moscow, MSU Publ., KolosS Publ., 2004, 460 p. (in Russian)
- Saet, Yu.E., Revich, B.A., Yanin, E.P. [Environment geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990, pp. 84–108. (in Russian)
- AMAP. Snow, water, ice and permafrost. Summary for policy-makers. In: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway, 2017, 20 p.
- Baglaeva, E.M., Sergeev, A.P., Shichkin, A.V., Buevich, A.G. The Effect of splitting of raw data into training and test subsets on the accuracy of predicting spatial distribution by a multilayer perceptron. *Mathematical Geosciences*, 2020, vol. 52, pp. 111–121.
- Dai, F., Zhoua, O., Lva, Z., Wang, X., Liu, G. Spatial prediction of soil organic matter content integrating artificial neural network and ordinary kriging in Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 2014, vol. 45, pp. 184–194.
- Demyanov, V., Gloaguen, E., Kanevski, M. A special issue on data science for geosciences. *Mathematical Geosciences*, 2020, vol. 52, pp. 1–3.
- Fernandez, J.M., Mayerle, R. Sample selection via angular distance in the space of the arguments of an artificial neural network. *Computers and Geosciences*, 2018, vol. 114, pp. 98–106.
- Frank, R., Ishida, K., Suda, P. Metals in agricultural soils of Ontario. *Canadian Journal of Soil Science*, 1976, vol. 56, pp. 181–196.
- Goovaerts, P. Geostatistics in soil science: State of the art and perspectives. *Geoderma*, 1999, vol. 89, pp. 1–45.
- Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants. Taylor and Francis Group CRC Press, 2011, pp. 201–260.
- Liodakis, S., Kyriakidis, P., Gaganis, P. Conditional Latin hypercube simulation of (log)Gaussian random fields. *Mathematical Geosciences*, 2018, vol. 50, pp. 127–146.
- Malof, J.M., Reichman, D., Collins, L.M. How do we choose the best model? The impact of cross-validation design on model evaluation for buried threat detection in ground penetrating radar. In: Proc. of Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXIII, 2018, vol. 10628, 106280C.
- Nath, A., Subbiah, K. The role of pertinently diversified and balanced training as well as testing data sets in achieving the true performance of classifiers in predicting the antifreeze proteins. *Neurocomputing*, 2018, vol. 272, pp. 294–305.
- Sakizadeh, M., Mirzaei, R., Ghorbani, H. Support vector machine and artificial neural network to model soil pollution: a case study in Semnan Province, Iran. *Neural Computing & Applications*, 2017, vol. 28, pp. 3229–3238.
- Sergeev, A.P., Buevich, A.G., Baglaeva, E.M., Shichkin, A.V. Combining spatial autocorrelation with machine learning increases prediction accuracy of soil heavy metals. *Catena*, 2019, vol. 174, pp. 425–435.
- Shacklette, H.T., Boerengen, J.G. Element concentrations in soils and other surficial materials of the conterminous United States. U.S. Geological Survey professional paper, US government printing office, Washington, 1984, 105 p.
- Shaker, R.R., Ehlinger, T.J. Exploring non-linear relationships between landscape and aquatic ecological condition in southern Wisconsin: A GWR and ANN approach. *International Journal of Applied Geospatial Research*, 2014, vol. 5 (4), pp. 1–20.
- Sun, C., Liu, J., Wang, Y., Sun, L., Yu, H. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China. *Chemosphere*, 2013, vol. 92 (5), pp. 517–523.
- Timofeeva, Y.O., Kosheleva Y., Semal V., Burdukovskii M. Origin, baseline contents, and vertical distribution of selected trace lithophile elements in soils from nature reserves, Russian Far East. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, vol. 18 (3), pp. 968–982.
- Wieland, R., Mirschel, W., Zbell, B., et al. A new library to combine artificial neural networks and support vector machines with statistics and a database engine for application in environmental modeling. *Environmental Modelling & Software*, 2012, vol. 25, pp. 412–420.
- WMO. The Global Climate in 2015–2019. In: World Meteorological Organization (WMO-№ 1249), Geneva, Switzerland, 2020, 24 p.
- Worsham, L., Markewitz, D., Nibbelink, N. Incorporating spatial dependence into estimates of soil carbon contents under different land covers. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, vol. 74, pp. 635–646.
- Ziggah, Y.Y., Youjian, H., Tierra, A.R., Laari, P.B. Coordinate transformation between global and local data based on artificial neural network with K-fold cross-validation in Ghana. *Earth Sciences Research Journal*, 2019, vol. 23 (1), pp. 67–77.